

Q 超快物理

分会召集人：李儒新、柳晓军、魏志义、金明星、赵增秀、吴成印

Q01

专题代号：Q

强场原子分子超快动力学研究

陆培祥

武汉光电国家研究中心，华中科技大学，武汉 430074

Email: lupeixiang@hust.edu.cn

强激光场下原子分子超快动力学的研究能够使人们更加清楚直观地认识光与物质相互作用的物理规律和动力学机制，一直是超快科学领域的研究热点。这里我将主要介绍我们在强场原子分子超快动力学研究方面取得的最新进展，主要内容有：（1）提出并实验验证了不依赖相位测量的分子轨道衍射成像方案，同时利用正交双色场调控电子轨迹实现了分子轨道的单发成像；（2）基于分子高次谐波的振幅和频率调制，实现了亚埃空间尺度下阿秒时间分辨的同位素分子核动力学测量，同时发展了角分辨的高次谐波光谱技术，实现了对分子转动波包时空演化过程的实时测量；（3）利用阿秒光电子全息技术实现了对分子内部超快电荷迁移、电子隧穿时间、以及隧穿初始位置和初始动量的精密测量。

Q002

专题代号：Q

Attoclock with sculpted circular fields

刘运全

State Key Laboratory for Mesoscopic Physics and Collaborative Innovation Center of Quantum Matter, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

原子分子内的电子运动时间尺度在阿秒（ 10^{-18} s）量级，能够追踪和测量原子或分子中电子的运动一直是物理学家的重要目标之一。超快激光技术的出现，使得探索原子分子内电子的超快动力学行为成为可能。基于圆偏振激光的阿秒钟(attoclock)技术是实现超快激光作用下原子的电子动力学测量的一种

重要的研究手段。在圆偏振激光作用下，激光电场在一个光周期[比如波长为 800nm 激光，光周期为 2.7 飞秒 (10^{-15} 秒)]内旋转 360 度，不同时刻电离的电子波包会在动量空间上被映射到不同的发射角。通过这种基于圆偏振激光的角度分辨 streaking 技术，对于 800 nm 激光可以实现 2.7 飞秒/360 度,即 7.5 阿秒/度的超高时间分辨能力，因此被称为阿秒钟。但之前的阿秒钟都是采用单束圆偏振激光实现的（激光场类于钟表的分针），无法通过光电子干涉对电子波包的相位进行测量，且阿秒钟的校准依赖于理论模型。

最近，我们进一步发展阿秒钟技术，采用双色（400nm + 800nm）圆偏振激光开展实验研究，实现了一种双指针阿秒钟测量，并发展了一种基于傅里叶变换的提取电子波包振幅和相位的方法，通过电子干涉图案获得电离电子的波包信息，实验上可提取的电子波包的相位和振幅。该提取方案是普适的，不依赖于任何理论模型。进一步，我们采用弱 400nm 线偏振激光对采用 800nm 圆偏振阿秒钟进行标记，从而实现了关于超快激光场下原子量子隧穿若干有争议问题的统一解释。

Q003

专题代号：Q

原子、半导体中时间分辨的强场超快电子动力学研究

杨玮枫

汕头大学理学院物理系，汕头 515063

Email: wfyang@stu.edu.cn

摘要：我们证明了一种新的载波粒子数转移，即由于带间激发态与带内运动的耦合作用，使得带间激发态的时间窗口非常短，这是近年来实验在半导体上观测到的能带内 HHG 增强和载流子包络相位异常依赖的原因。这一结果解释了带内和带间的动力学是如何耦合在一起的，以及为什么带间极化可以在许多半导体中控制 HHG 的发射这一个备受争议的话题。

半导体中的高次谐波产生(HHG)最近为强场物理和阿秒科学开辟了新的研究领域，它可以用来研究和控制时域的基本物理过程，并使基于光的超快电子和阿秒脉冲产生的各种应用成为可能。然而，直到现在，潜在的物理机制还没有完全被理解并引起激烈的争论。在半导体器件中，带间极化和带内电流是产生 HHG 的两个基本来源。迄今为止，大量的理论和实践研究表明，在中红外场中，ZnO、MgO 和 GaAs 带间的贡献占主导地位[1-6]。然而，对于它为何占主导地位以及这两种机制如何在亚光周期时间尺度内相互耦合，我们知之甚少。

这一发现不仅为最近在 MgO[5]的 HHG 实验中观测到的异常载波包络相位依赖提供了物理上的解释，而且解释了为什么带间极化主导了耦合的带内和带间动力学。仿真结果与[5]和[6]的实验结果吻合较好，验证了该方法的有效性。此外，我们的研究结果阐明了半导体和原子间 HHG 产生和控制机制的本质区别:(i)在原子 HHG 中，电离过程不能被连续态的电子运动所影响，而在半导体中，带内运动可以

显著影响带间的激励。(ii)阿秒脉冲爆发在原子中电离后约为光周期的 3/4, 而在半导体中, 发生在电子激发后光周期的 1/4。在此基础上, 我们进一步证明了带间激发可以通过适当的双色场来控制。在没有相位补偿的情况下, 可以产生覆盖整个平台区域的超宽超连续谱, 直接产生孤立的阿秒脉冲。

关键词: 阿秒脉冲, 载波粒子数转移

参考文献

- [1] Ghimire S *et al* 2011 *Nat. Phys.* [7 138](#)
- [2] Vampa G *et al* 2014 *Phys. Rev. Lett.* [113 073901](#)
- [3] Vampa G *et al* 2015 *Nature* [522 462](#)
- [4] Song X *et al* 2019 *Opt. Express* [27 2225](#)
- [5] You Y *et al* 2017 *Opt. Lett.* [42 1816](#).
- [6] Schlaepfer F *et al* 2018 *Nat. Phys.* [14 560](#).

基金项目: 广东省自然科学基金重点项目 (NO. 2014A030311019)。国家自然科学基金 (NO. 11374202)

Q004

专题代号: Q

基于不同光谱展宽机制的 CEP 锁定效果比较研究

高亦谈¹, 赵昆^{1*}, 梁玥瑛¹, 许思源², 江昱姣², 王佳³, 贺新奎¹, 滕浩¹, 朱江峰², 陈云琳³, 魏志义^{1*}

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西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071;

³北京交通大学理学院微纳材料与器件实验室, 北京 100190;

*Email: zhaokun@iphy.ac.cn, zywei@iphy.ac.c

摘要: 载波包络相位 (CEP) 对于光场形状敏感的物理现象研究起着至关重要的作用 [1]。基于 f-2f 干涉测量的 CEP 锁定技术的关键是获得一个倍频程的光谱, 其可以通过多种展宽技术获得[2,3]。为了更好的 CEP 锁定效果, 我们对不同光谱展宽技术进行比较研究, 模拟了其引入的相位噪声并分析了产生机理, 以及探测器分辨率不足带来的测量误差。该研究对于如何优化 CEP 的锁定效果有参考意义。

实验中我们使用钛宝石放大后的光源，在分别采用白宝石片、熔石英薄片组及中空波导得到宽带超连续光谱的基础上，实现了 CEP 的锁定测量（图 1a）。随后我们通过计算非线性薛定谔方程模拟光谱展宽介质内的脉冲传播，计算了输出脉冲的内相干性 [4]，得到了不同光谱展宽过程引入的 CEP 噪声（图 1b）。此外我们还模拟了光谱仪采样间隔的不足引入的测量误差（图 1c）。分析可知：薄片组能够引入最小的相位噪声，最适合用于 CEP 稳定的周期量级光源产生。此外还需要选取合适的光谱仪分辨率，以减少不可被反馈环路所抑制的相位噪声。该研究将对未来实现更高精度的周期性光场的时域控制提供参考。

关键词：载波包络相位 相位噪声 非线性效应

参考文献

- 【1】 F. Krausz *et al.*, Attosecond physics, *Rev. Mod. Phys.* 2009, 81, 163.
- 【2】 M. Hiroki *et al.*, Carrier-envelope phase stabilized 5.6 fs, 1.2 mJ pulses, *Appl. Phys. Lett.* 2007, 90, 161114.
- 【3】 W. He *et al.*, Coupling between energy and phase in hollow-core fiber based f-to-2f interferometers, *Opt. Express*, 2009, 17, 12082.
- 【4】 N. Raabe *et al.*, Role of Intrapulse Coherence in Carrier-Envelope Phase Stabilization, *Phys. Rev. Lett.* 2017, 119, 123901.

基金项目：国家重点研发计划(NO. 2017YFB0405202)、国家自然科学基金 (NO. 61690221 等)

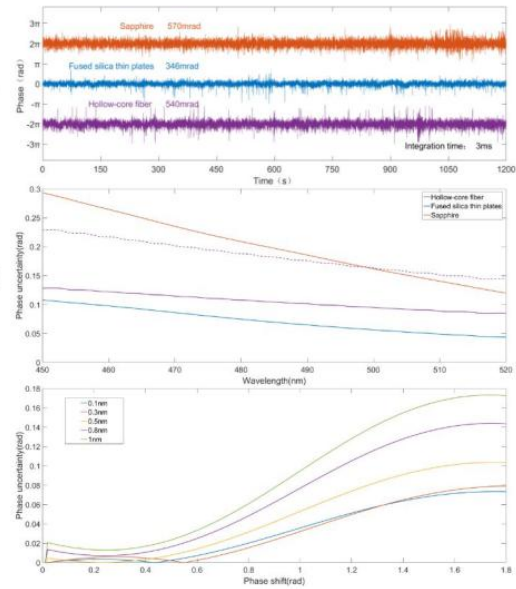


图 1 (a) 实验上 CEP 测量值 (b) 模拟展宽过程引入的 CEP 噪声 (c) 模拟光谱仪分辨率的噪声引入。

Q005

专题代号：Q

基于飞秒激光瞬态光谱对多能级系统的动力学研究

刘作业*, 何宇, 王贞浩, 张杨华, 胡碧涛*

兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000

Email: zyl@lzu.edu.cn

摘要：物质吸收光谱线的吸收形状蕴含了丰富的系统结构和动力学信息，特别是体系的极化响应信息。基于泵浦-探测测量的瞬态吸收光谱技术，通过调节泵浦脉冲和探测脉冲之间的时间延迟实现了飞秒量级的时间分辨测量，已成为了研究超快过程的常用手段。我们系统地研究了 Rb 原子中 V-型三能级和分子 IR144 体系的瞬态吸收光谱，通过吸收光谱谱线形状的变化提起系统的动力学信息。

首先，反转泵浦和探测脉冲到达靶物质的顺序，提出了利用激光诱导相位模型分析吸收谱线型的变

化，并利用多个参数表征泵浦脉冲对探测脉冲所激发的量子系统的影响，最终实现对系统的动力学变化的量化。其次，增加原子密度，吸收谱线型随密度变化而变化，这表明原子间的集体相互作用应被考虑，因而研究了系统从单原子极限到宏观介质下的动力学演化。随后，基于三阶微扰论并在跃迁偶极矩中引入修正因子，提出了适用于中等强度激光场（弱场和强场的过渡区域）的解析模型，对 Rb 原子多能级系统的吸收谱进行了解释。最后，我们将体系推广到复杂的大分子体系 IR144，研究了体系的吸收谱形成和偶极子的相位调制，发展一种适用于大分子体系中偶极子衰变过程的理论模型，并将理论计算与实验测量进行对比研究，验证相位操控理论对于复杂分子体系的适用性。光谱线型对激光强度和原子密度的敏感依赖指出了通过强激光和传播效应整形脉冲的可能性，为在超短时间尺度上量子行为的操控奠定了基础。

关键词：系统动力学，相位，中等强度光场，传输效应

参考文献

- 【1】 Z. Y. Liu *et al*, Phase Reconstruction of Strong-Field Excited Systems by Transient-Absorption Spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.* 2015, 115, 033003.
- 【2】 Yu He *et al*, Signatures of self-modulation effects during pulse propagation in single-pulse absorption spectra, *Phys. Rev. A.* 2019, 99, 053418
- 【3】 Y. H. Zhang *et al*, Phase reconstruction of a strong-laser-field-excited complex molecular system *Phys. Rev. A* 98, 033412 (2018)
- 【4】 Z. H. Wang *et al*, Ultrafast dynamic evolution of multilevel systems in mediumstrength laser fields, *New J. Phys.* 21 (2019) 053007
- 【5】 Z. Y. Liu *et al*, Observation and quantification of the quantum dynamics of a strong field excited multi-level system, *Sci. Rep.* 2017, 7, 39993.

基金项目：国家自然科学基金项目（NO. 11504148）

Q006

专题代号：Q

飞秒激光与气体相互作用的超快光源产生及应用

吴成印

北京大学物理学院，北京 100871

Email: cywu@pku.edu.cn

摘要：飞秒激光具有超短的脉冲宽度和超高的峰值功率，它和气相原子分子相互作用是一种极端非线性过程，能够辐射能量覆盖太赫兹-可见-真空紫外-X射线波段的光子，为超快可调谐光源的产生提供了重

要手段。我们在北京大学建立了原子分子强场物理实验平台，通过对飞秒激光与原子分子相互作用产物光子、电子、离子进行测量，深入研究了飞秒激光和原子分子相互作用机理。本报告围绕飞秒激光与气体相互作用的超快光源产生及应用，分为两个部分：1) 介绍基于飞秒激光和原子分子相互作用的高次谐波技术，我们在实验室建立的两台台式化超快真空紫外光源。该光源分别与速度成像谱仪和光电子显微镜结合，开展激光驱动的原子分子以及微纳结构的光电子动力学研究。2) 介绍我们在氮气分子离子激光方面的研究进展，氮气分子离子激光由于其在大气远程探测领域的重要应用而备受关注。波长800纳米飞秒激光和氮气分子相互作用，在激光的传播方向上除观察到高次谐波外，还观察到氮气分子离子电子激发态到电子基态跃迁的相干辐射。通过注入不同波长的种子光或/和控制光，我们对氮气离子空气激光的物理本质以及产生条件进行了深入研究，为氮气离子空气激光优化提供指导。

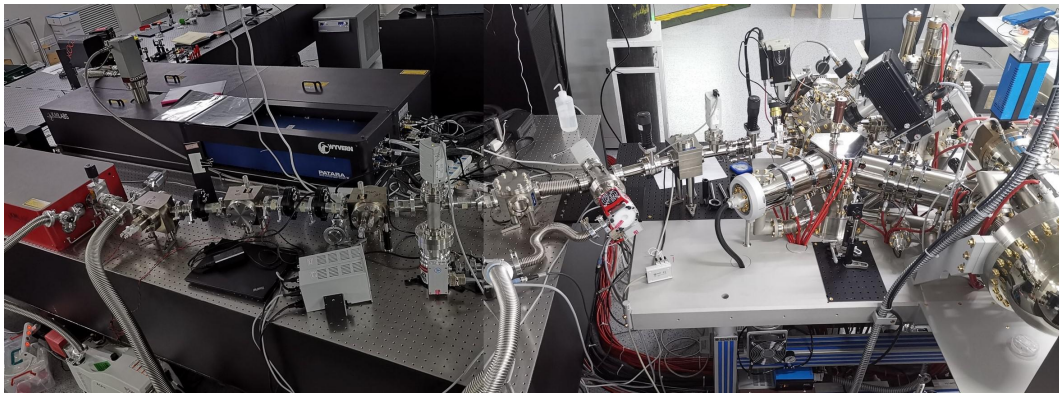


图1: 新建的气体高次谐波的光电子发射显微镜。

关键词: 高次谐波, 光发射电子显微镜, 空气激光, 超荧光

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2018YFA0306302) 和国家自然科学基金 (No. 11625414)。

Q007

专题代号: Q

氮气离子超荧光增强

郑伟、缪志明、张林林、汪洋、戴晨、吴成印

北京大学物理学院, 北京 100871

Email: cywu@pku.edu.cn

摘要: 飞秒激光空气传输成丝产生的窄线宽、波长可调谐的相干辐射, 由于其在大气远程传感中的重要应用而受到人们的高度关注。在波长 800 纳米飞秒激光电离氮气分子体系中。我们发现: 当注入一束波长为 428 纳米的外部种子光时, 在激光的传播方向上, 428 纳米和 391 纳米附近的相干辐射的强度都实现了显著增强。我们知道 391 纳米和 428 纳米分别对应氮气离子 $B^2\Sigma_u^+(v'=0) \rightarrow X^2\Sigma_g^+(v=0)$ 和 $B^2\Sigma_u^+$

$(v'=0) \rightarrow X^2\Sigma_g^+(v=1)$ 跃迁。通过对相干辐射的时间特性和增益特性进行研究，我们得出结论：428 纳米附近的相干辐射本质是外部种子光诱导的氮气离子的超荧光辐射，而 391 纳米附近的相干辐射则是由 428 纳米附近的相干辐射通过受激拉曼过程转化产生。通过理论计算和遗传算法，我们确定了本研究涉及的量子态 $B^2\Sigma_u^+(v'=0)$ 、 $X^2\Sigma_g^+(v=0)$ 和 $X^2\Sigma_g^+(v=1)$ 的转动温度和振动布居，结果证实了 $B^2\Sigma_u^+(v'=0)$ 和 $X^2\Sigma_g^+(v=0)$ 之间振动布居实现了反转。

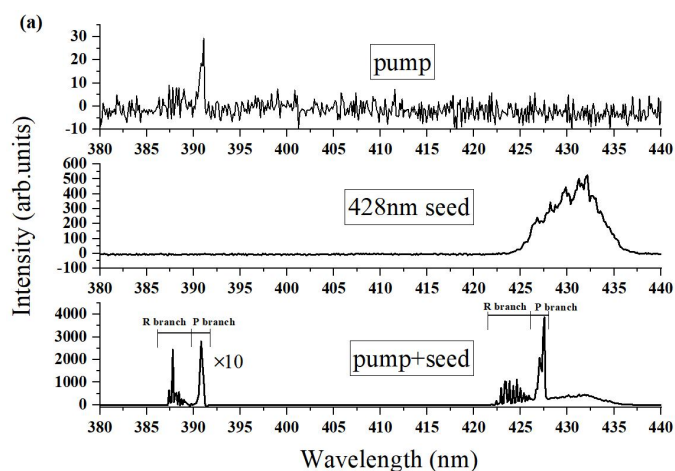


图 1: (上图) 800 纳米泵浦激光在氮气中传输前向辐射, (中图) 428 纳米种子光光谱, (下图) 800 纳米泵浦激光和 428 纳米种子光同时作用时前向辐射谱。

关键词: 超荧光, 受激拉曼, 遗传算法, 转动温度, 粒子数分布

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 11625414, 21673006)

Q008

专题代号: Q

甲烷水合物界面成核、分解过程的非线性光谱学研究

梁荣达¹、徐辉杰¹、沈宇能¹、孙树梅¹、徐纪玉²、孟胜²、

沈元壤^{1,3}、田传山^{1,4,*}

¹ 复旦大学物理系、应用表面物理国家重点实验室、微纳光子结构教育部重点实验室, 上海 200433

² 中国科学院物理研究所、北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190

³ Department of Physics, University of California at Berkeley, Berkeley, California 94720, USA

⁴ 人工微结构科学与技术协同创新中心, 南京 210093

*Email: cstian@fudan.edu.cn

摘要： Among natural energy resources, methane clathrate has attracted tremendous attention because of its strong relevance to current energy and environment issues. Yet little is known about how the clathrate start to nucleate and disintegrate at the molecular level, because such microscopic processes are difficult to probe experimentally. Using surface-specific sum-frequency vibrational spectroscopy, we have studied in situ the nucleation and disintegration of methane clathrate embryos at the methane gas/water interface under high pressure and different temperatures. We find a clear vibrational spectral feature of an intermediate microscopic structure appears in induction time. Our findings not only provide a better microscopic understanding on the nucleation mechanism of clathrates, but also open up an opportunity for rational control of their formation and disintegration.

关键词： 甲烷水合物、成核过程、和频振动光谱

基金项目： 国家自然科学基金项目（No. 11290161, No. 11374064, No. 21803012）等

Q009

专题代号： Q

超快压缩时间-光谱成像： 单次曝光捕捉 fs 超快过程

陈烽

西安交通大学

摘要

Ps-fs 时间尺度内的超快成像以及超快光谱图像探测技术对于人们研究诸如飞秒光化学、超快激光与物质相互作用以及可控核聚变等基础科学和重大工程问题具有十分重要的意义。传统的泵浦探测技术可以对 fs 级超快过程实现直接观测，但该技术只能针对可以精确重复的超快过程，从而限制了其在更广泛领域的应用。近年来，研究人员相继发明了若干种单次曝光下获得完整超快过程影像的成像技术，但如同时对超快时间过程以及超快光谱进行高帧率、高帧数以及高光谱分辨探测仍然是一个待解决的问题。另一方面，当前可实现高帧率、高帧数的超快成像技术依赖于昂贵的条纹相机，如何降低超快过程的观测成本也被人们所关注。

针对当前超快过程领域研究中的实际需求和潜在的重大应用前景，我们提出了一种“可压缩的时间-光谱耦合超快成像”（compressed ultrafast spectral temporal photography, 英文简称

CUST) 方法。这种新的技术通过单次曝光就可以获得 60 帧超快影像，并保持了 3.85 THz 的超高帧率以及亚纳米级别的光谱分辨率。通过 CUST 技术，我们准确记录了强激光光束在非线性介质中的传播、反射以及自聚焦等持续时间约 20 ps 的物理过程。由于具备了超快时间-光谱图像信息的探测能力，该技术有望在众多基础物理-化学研究领域及工程技术领域得到广泛的应用。

Q010

专题代号：Q

Ultrafast decay dynamics of higher-lying excited states of water

G. Wu*, D. Yang, Y. Min, Z. He, Z. Chen, K. Yuan and X. Yang

State Key Laboratory of Molecular Reaction Dynamics, Dalian Institute of Chemical Physics,
CAS, Dalian 116023, China

Study of the photophysical and photochemical processes in the electronically excited states of water is very important in the understanding of atmospheric chemistry. It also serves as an ideal model system to study complicated excited-state dynamics of polyatomic molecules. Excited-state dynamics of water molecules has been intensively studied, both experimentally and theoretically, for more than four decades and rich information has been obtained from various studies, such as absorption spectra, resonance-enhanced multiphoton ionization (REMPI) spectra, OH product fluorescence excitation spectra, H product action spectra and photodissociation dynamics, time-resolved excited-state dynamics, etc.

Among these studies, experiments are mainly limited to the frequency domain, due to the lack of the wavelength-tunable fs laser source in the VUV range. In the last couple of years, we have studied the ultrafast decay dynamics of water molecules excited into the C, D, D', D'' and F states, by using two-photon excitation and time-resolved photoelectron imaging (TRPEI) techniques. Extensive information on the ultrafast decay dynamics of these higher-lying excited states has been derived. In this talk, a detailed report on the experimental results will be given.

References:

- [1] Z. He, Z. Chen, D. Yan, D. Dai, G. Wu and X. Yang, *Chin. J. Chem. Phys.* 30, 247 (2017).
- [2] Z. He, D. Yang, Z. Chen, K. Yuan, D. Dai, G. Wu and X. Yang, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 19, 29795 (2017).
- [3] D. Yang, Y. Min, Z. Chen, Z. He, Z. Chen, K. Yuan, D. Dai, G. Wu and X. Yang, *Chin. J.*

Chem. Phys. 32, 59 (2019).

[4] Y. Min, D. Yang, Z. He, Z. Chen, K. Yuan, D. Dai, G. Wu and X. Yang, Phys. Chem. Chem. Phys., submitted.

Q011

专题代号: Q

飞秒激光诱导空气等离子体辐射太赫兹脉冲的频率调谐

张振、陈燕萍、张喆林、夏天昊、张嘉阳、盛政明、张杰

上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

Email: namezhangzhen@sjtu.edu.cn

摘要: 太赫兹波, 是介于光学和电子学频段的电磁波。太赫兹波具有高带宽、光子能量低、高的穿透性等优点, 可以被广泛的应用于机场的安检、生物医学成像和通信领域。利用飞秒激光在空气中成丝的方法可以辐射出宽带的强太赫兹波, 而开展太赫兹波频率调控的研究, 有助于加深对太赫兹辐射物理机制的理解, 进而拓展太赫兹波在各领域的应用。

我们团队开展了直流电场调控下双色激光激发太赫兹脉冲频谱特性的研究。研究表明: 随着 BBO 晶体旋转角度的增加, 太赫兹波的峰值频率发生蓝移; 我们从直流场诱导的太赫兹辐射和双色场诱导产生的太赫兹辐射之间的竞争关系出发, 解释了太赫兹波频率发生蓝移的原因。同时, 我们研究了泵浦激光能量对双色场激发太赫兹波峰值频率的影响。研究表明: 随着泵浦激光能量的增加, 太赫兹波的峰值频率发生红移。我们从 800nm 激光和 400nm 激光在时间和空间上重合度降低的角度, 解释了太赫兹波峰值频率发生红移的原因。我们提供了一种简单地调谐太赫兹脉冲峰值频率的方法, 有助于拓展飞秒激光成丝辐射的太赫兹脉冲在太赫兹遥感中的应用。

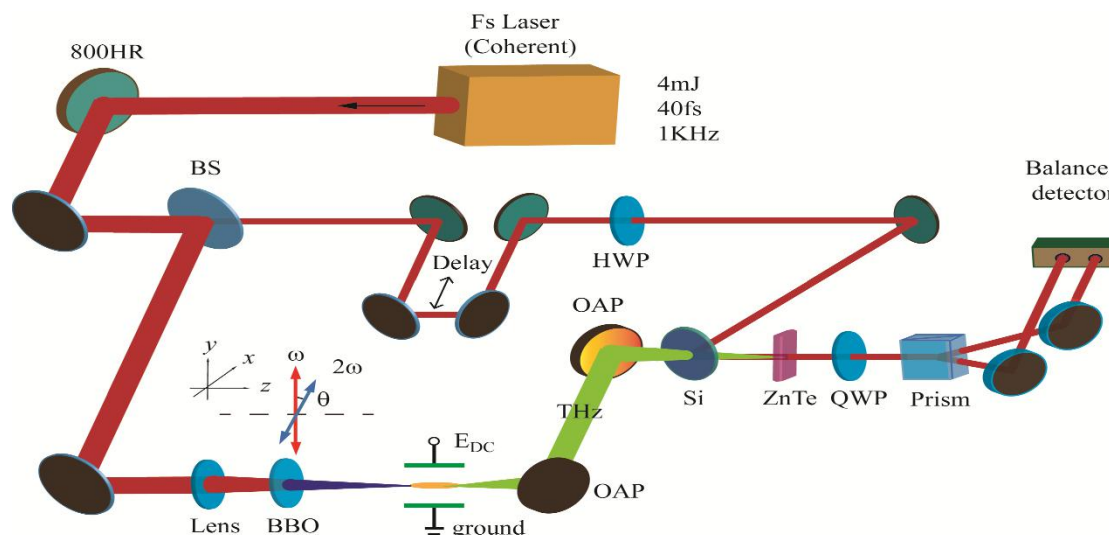


图 1 飞秒激光诱导空气等离子体辐射太赫兹脉冲的光路图

关键词：太赫兹波 飞秒激光 双色场 频谱调谐

【1】 Zhen Zhang et al, Optimum chirp for efficient terahertz generation from two-color femtosecond pulses in air. *Appl. Phys. Lett.* 2018, 113, 241103.

【2】 Zhen Zhang et al, Frequency manipulation of terahertz radiation from femtosecond laser induced air plasma, submitted.

基金项目：国家自然科学基金项目 (NO. 11474202, 11655002, 11774228 和 11721091) 等

Q012

专题代号：Q

有机共轭材料化学结构与非线性光学性质的构效关系研究

任相魁¹、张丹¹、刘智波³、田建国³、宋瑛林²

¹天津大学化工学院，天津 300350

²苏州大学物理学院，苏州 215006

³南开大学物理学院，天津 300071

Email: renxiangkui@tju.edu.cn

摘要： 茚酰亚胺 (PDI) 等有机共轭材料在非线性光学等领域具有广阔的应用前景¹⁻²，如何灵活调控其非线性光学性质是该类材料研究所面临的一个关键科学问题。我们以四氯茚酮为主要原料，合成了具有不同湾位取代基的 PDI 衍生物：POSS-NH₂PDI 和 POSS-AMPDI (图 1a)。Z-扫描实验结果表明 POSS-NH₂PDI 具有饱和吸收特性，而湾位酰胺化改性的 POSS-AMPDI 则表现出反饱和吸收特性 (图 1b)，在光限幅方面具有潜在应用价值；理论拟合结果显示有效非线性吸收系数随着入射光能量的增强而逐渐增大，说明 POSS-AMPDI 的反饱和吸收性质是由双光子吸收以及双光子诱导的激发态吸收共同作用引起的。同时，由于具有电子转移和 Si-O 键断裂的双重检测机制，POSS-AMPDI 能够选择性地快速识别微量氟离子并可实现定量检测 (图 1c)，在荧光探针领域具有潜在应用价值。在此基础上，我们进一步合成了双边硒环化 PDI 衍生物和 PDI 寡聚物分子，发现系统调节 PDI 的化学结构，可使材料实现对绿光和近红外光的反饱和和吸收及光限幅效应。以上结果为新型非线性光学材料的设计和制备提供了重要的理论和实验依据。

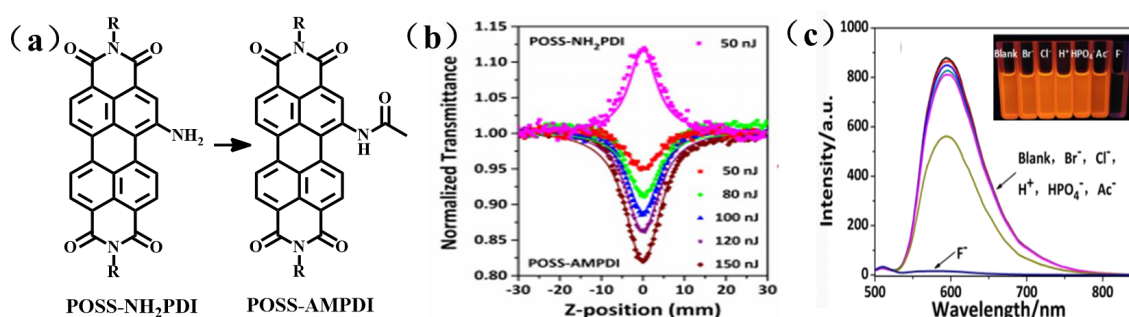


图 1 (a) PDI 衍生物的化学结构; (b) 飞秒脉冲 Z-扫描曲线; (c) 氟离子检测光谱

关键词: 有机共轭材料, 非线性光学, 反饱和吸收, 光限幅

参考文献:

- 【1】 Gao *et al.*, Polyhedral oligosilsesquioxane tethered perylene diimide for application in optical limiting and rapid detection of fluoride ions, *Chemical Communications*, 2019, 55, 3012-3014.
- 【2】 Ben *et al.*, Synthesis, crystal structure, enhanced photoluminescent property and fluoride detection ability of S-heterocyclic annulated perylene diimide-polyhedral oligosilsesquioxane dye. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5: 2566-2576.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 21875157)

Q013

专题代号: Q

压力下分子激发态超快动力学研究

石英¹, 李慧¹, 赵慧芳¹, 刘晓春¹, 尹航¹, 罗毅², 刘才龙¹, 金明星¹,

丁大军¹

¹ 吉林大学原子与分子物理研究所, 长春 130012

² 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 合肥 230026

Email: shi_ying@jlu.edu.cn

摘要: 压力作为一种重要的环境因素, 可以有效缩短分子间距离, 改变分子间的作用力, 产生许多新奇的物理现象。通过对压力下分子激发态动力学的测量, 可以揭示压力诱导分子奇异性的微观物理机制, 进而为提高极端条件下分子、材料的应用提供了新的途径。本报告我们将介绍近年来我们在高压下分子内和分子间激发态动力学方面的研究进展。我们将飞秒瞬态吸收光谱技术和金刚石对顶砧技术相结合, 研究了压力对香豆素分子内扭转电荷转移过程【1】以及压力对 CdSe/ZnS 核壳量子点与蒽醌分子之间电子转移过程的影响【2】。通过理论计算, 我们获得了分子激发态的结构和电荷分布信息。我们研究结果表明, 压力下的溶剂不仅能够作为传压介质, 而且压力诱导的溶剂相变能够有效的调控分子内和分子间的超快过程。高压瞬态吸收光谱技术是研究高压下分子激发态动力学的一种有效手段。

关键词: 压力, 飞秒瞬态吸收, 分子激发态

参考文献

- 【1】 H. Li *et al.*, Lighting Up Invisible Twisted Intramolecular Charge Transfer State by High Pressure, *J. Phys. Chem. Lett.* 2019, 10, 748-753.
- 【2】 H.F. Zhao *et al.*, Pressure-Induced Tunable Electron Transfer and Auger Recombination Rates in CdSe/ZnS Quantum Dot - Anthraquinone Complexes, *J. Phys. Chem. Lett.* 2019, 10, 3064-3070.

Q014

专题代号：Q

相干合成超快光场的全相位锁定调控

方少波

中国科学院物理研究所 光物理重点实验室，北京 100190

Email: shaobo.fang@iphy.ac.cn

摘要：飞秒激光脉冲的相干合成，不仅能突破单束激光脉冲所能提供的峰值功率限制的瓶颈，有效提高激光脉冲的总能量，还是获得亚周期激光脉冲的重要手段。因此，超快激光脉冲之间的同步与相干合成已成为近年来激光物理领域的重要研究课题，其关键技术之一是脉冲之间的全相位锁定与调控，所涉及的两个主要变量分别是单个脉冲的载波包络相位（Carrier-Envelope Phase, CEP）及反映两束脉冲包络相位差的相对延时（Relative Timing, RT）。特别是对于脉宽极短的少周期激光脉冲，上述两个变量直接影响着合成脉冲的电场波形。目前，单纯锁定超快激光脉冲 CEP 已有成熟的研究成果，但基于同一装置实现 RT 与 CEP 的实时测量锁定还未见报道，这已成为实现亚周期超快激光脉冲相干合成的主要瓶颈之一。近期，我们利用 f-to-2f 自参考装置，将两束待合成超快激光中的长波部分倍频后与短波部分进行光谱干涉，通过傅里叶变换分别提取出 RT 与 CEP 的信息并同时进行反馈锁定，仅使用一套自参考装置，实现了准单周期激光脉冲之间的全相位锁定调控，锁定时长超过 8 小时（图 1）。此成果不仅有效简化了相干合成超快光场的全相位控制，同时为新型光场调控物理提供了全新的研究手段。

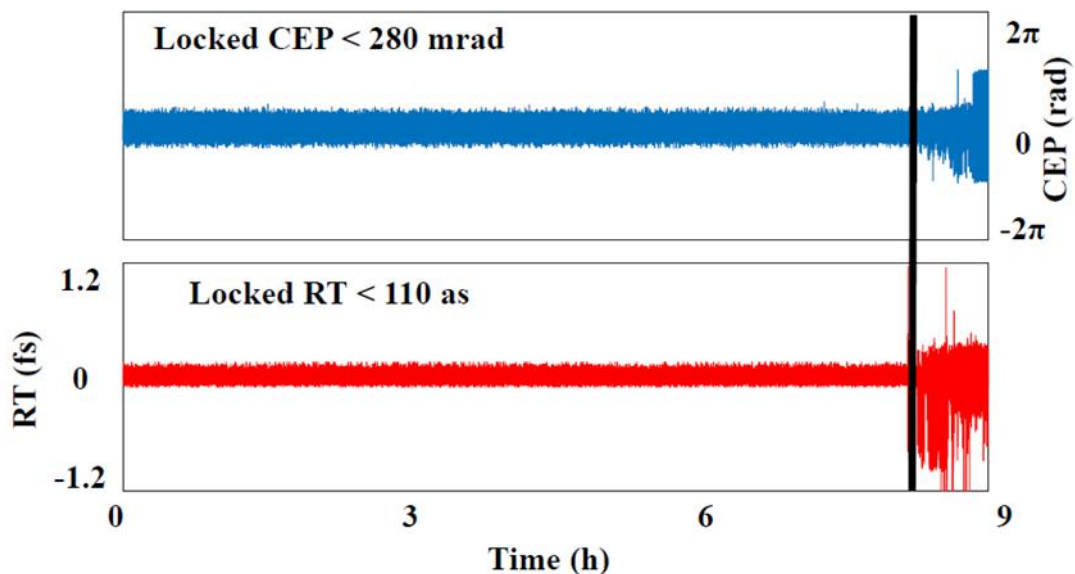


图 1 CEP 与 RT 长时间（8h）锁定结果。

关键词：亚周期 相干合成 超快光场

P. Huang, Shaobo Fang et al., *Appl. Phys. Lett.* **115**, 031102 (2019)

O. Mucke, Shaobo Fang et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21**, 8700712 (2015)

Q015

专题代号：Q

HCCI⁺离子中电荷转移的退相干和复相干

贾东明、Jörn Manz、杨勇刚

山西大学激光光谱研究所，坞城路 92 号，山西太原，030006

Email: dmjia@email.sxu.edu.cn

摘要：飞秒和阿秒是电子和核运动的自然时间尺度。；例如分子振动一个周期的时间大约是飞秒范围，电荷从一个分子位置迁移到另一个分子位置大约在阿秒范围。而电荷转移由于原子核的动力学影响会发生退相干。我们模拟了通过超短激光脉冲引起的电子态的叠加而产生电荷转移。这是由于阿秒尺度下原子核波函数处于重叠状态当处于不同电子态原子核的重叠会衰减时，在几飞秒时间尺度上引起电荷迁移的退相干。然而，原子核运动可能会在更长的时间尺度（通常是几百飞秒）上原子核波函数再次重叠。同时，这也会引起电荷迁移的反相干。这一新现象为通过激光控制原子核运动的相干控制电子运动开辟了新的途径。通过对 HCCI⁺离子系统的量子动力学模拟也证明了这一点^[1]，模拟的实验细节请参阅文献 [2]，由 Kraus 等人实现了 HCCI⁺离子电荷迁移的首次联合实验和理论重构。模拟的理论方法请参阅文献 [3]，由 Manz 等人发展的电子流计算方法。

关键词：电荷转移，量子动力学模拟，电子流，退相干

参考文献

- 【1】. D Jia, J Manz, Y Yang, De- and Recoherence of Charge Migration in Ionized Iodoacetylene. *J. Phys. Chem. Lett.* 2019, 10, 4273
- 【2】 T. Bredtmann, D. J. Diestler, S.-D. Li, J. Manz, J. F. Pérez-Torres, W.-J. Tian, Y.-B. Wu, Y. Yang and H.-J. Zhai, Quantum theory of concerted electronic and nuclear fluxes associated with adiabatic intramolecular processes. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015, 17, 29421
- 【3】 P. M. Kraus, B. Mignolet, D. Baykusheva, A. Rupenyanyan, L. Horný, E. F. Penka, G. Grassi, O. I. Tolstikhin, J. Schneider, F. Jensen, L. B. Madsen, A. D. Bandrauk, F. Remacle and H. J. Wörner, Measurement and laser control of attosecond charge migration in ionized iodoacetylene *Science* 2015, 350, 790-795.

基金项目：国家重点研发项目（NO. 2017YFA0304203）等

基于多模光纤锁模的光纤激光器

赵凤艳, 王屹山, 王虎山, 张伟, 胡晓鸿

中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室
西安市高新区信息大道 17 号, 710119

Emai: zhaofengyan1984@163.com

摘要: 超短脉冲激光技术的迅猛发展不断推进了新材料、新技术以及新产业的涌现, 促进了光通讯、光传感、生物医学、光频梳及微加工等前沿研究领域的快速发展, 为人们认识和探索未知领域提供了重要工具。渐变折射率多模光纤作为可饱和吸收体的出现, 解决了传统可饱和体在锁模光纤激光器中的弊端, 极大的促进全光纤锁模激光器的进程, 具有潜在的应用价值和更为广泛的研究意义。渐变折射率多模光纤因具有特殊的折射率分布轮廓, 导致光脉冲传输其传播常数随着模阶数的增加而出现线性递减的趋势, 光在其传输过程中形成自然地周期性自成像。因此, 渐变折射率多模光纤独有特性导致光纤中不同模式间发生较强的耦合效应, 这为研究多模光纤中复杂的时空非线性动力学提供了理想的测试平台。与其他锁模器件相比, 基于多模光纤可饱和吸收体具有可承受高功率传输、损伤阈值高、性能不随时间退化、价格低廉等优点成为近年来科研人员研究热点。

课题组团队采用渐变折射率多模光纤与阶跃折射率多模光纤的混合结构成功的实现了高能量全光纤结构超短脉冲激光器。此外, 该团队利用多模光纤可饱和吸收体搭建了束缚态孤子锁模光纤激光器, 获得了稳定的同相位和反相位束缚态孤子。随后, 利用多模光纤可饱和吸收体在谐振腔中实现了展宽脉冲输出, 展宽脉冲的 3dB 光谱宽度为 14.2 nm, 相应的脉冲宽度为 310 fs, 是目前基于多模光纤可饱和吸收体实现的最短的脉冲, 为高稳定高能量超短脉冲光纤激光器的实现提供了新型途径。

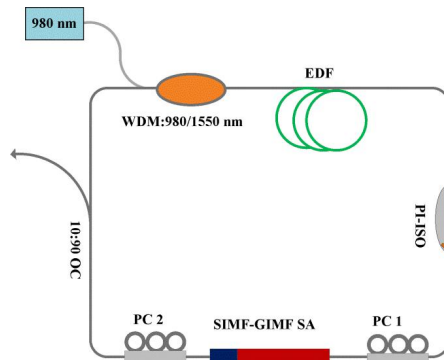


图 1 多模光纤锁模光纤激光器原理图。

关键词: 传统孤子 束缚态孤子 展宽脉冲 多模光纤 锁模光纤激光器

参考文献:

- 【1】 F.Y. Zhao, H. S. Wang, Y. S. Wang, X. H. Hu, W. Zhang, T. Zhang, Y. J. Cai. High-energy solitons generation with nonlinear multimode interference based saturable absorber [J]. *Laser Physics*, 2018, **28**(8): 085104.
- 【2】 F. Y. Zhao, H. S. Wang, Y. S. Wang, X. H. Hu, W. Zhang, T. Zhang, C. D. Sun, Z. J. Yan. Experimental observation of bound solitons with nonlinear multimode interference based saturable absorber [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, **15**(11): 115106.

- 【3】 F. Y. Zhao, Y. S. Wang, H. S. Wang, X. H. Hu, W. Zhang, T. Zhang, K. M. Zhou, Z. J. Yan. Ultrafast soliton and stretched-pulse switchable mode-locked fiber laser with hybrid structure of multimode fiber based saturable absorber [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 16369.

基金项目： 国家自然科学基金项目（61605239,61690222）

Q017

专题代号： Q

蓝光激光二极管抽运的克尔透镜锁模钛宝石激光器

刘寒¹、王阁阳¹、蒋健旺¹、田文龙¹、张大成¹、韩海年²、

朱江峰^{1,*}、魏志义^{2,**}

¹ 西安电子科技大学物理与光电工程学院， 西安 710071

² 中国科学院物理研究所光物理重点实验室， 北京 100190

E-mails: *jfzhu@xidian.edu.cn; **zywei@iphy.ac.cn

摘要： 随着高亮度、高功率的蓝绿激光二极管（LD）的问世，给予了钛宝石激光器新的发展思路，即采用蓝绿光 LD 直接泵浦钛宝石产生飞秒脉冲，可极大降低传统钛宝石飞秒激光器系统的体积和成本。自 2009 年以来，美国、日本等研究小组陆续报道了蓝绿光 LD 直接泵浦的钛宝石飞秒激光器 [1-2]。本报告报道我们采用蓝光 LD 直接泵浦钛宝石实现克尔透镜锁模运转的实验工作，得到了 10 fs 的超短脉冲输出。采用一个 3.5 W、455 nm 的多模蓝光 LD 作为钛宝石激光器的泵浦源，通过一组柱面透镜对其光束进行整形，使其快、慢轴发散角更为接近，以获得更小的聚焦光斑。整形后的泵浦光由一个平凸透镜聚焦于钛宝石晶体中，晶体处泵浦光束腰半径为 22 μm ×51 μm 。谐振腔采用经典的 Z 型腔结构，CM1 和 CM2 是曲率半径为 50 mm 的宽带双啁啾镜，激光腰斑半径约为 20 μm ，与泵浦光在纵向上有较好的模式匹配。采用双啁啾镜（CM1、CM2、CM3、CM4）和熔石英三棱镜对(P1、P2)搭配的色散补偿方案，对腔内净色散可实现连续调节。移动 CM2 至合适的位置，推动三棱镜 P2 即可实现克尔透镜锁模。当泵浦功率为 3.5 W 时，采用 1%输出率的耦合输出镜（OC）获得了 27 mW 的锁模输出，锁模光谱呈现宽谱多峰状（图 1.(b)），该光谱可支持 8.4 fs 的傅里叶变换极限脉冲。我们使用商用干涉自相关仪（Femtolasers GmbH）对锁模脉冲宽度进行测量，直接从 OC 处输出的脉冲宽度为 19

fs。随后，通过一对双啁啾镜（CM5、CM6）和一对尖劈对激光脉冲进一步腔外压缩至 10 fs，如图 1.(c)所示。据我们所知，这个结果是目下由 LD 直接泵浦钛宝石激光输出的最短脉冲，后续将采用更加精细的色散补偿以实现亚 10 fs 的激光脉冲输出。

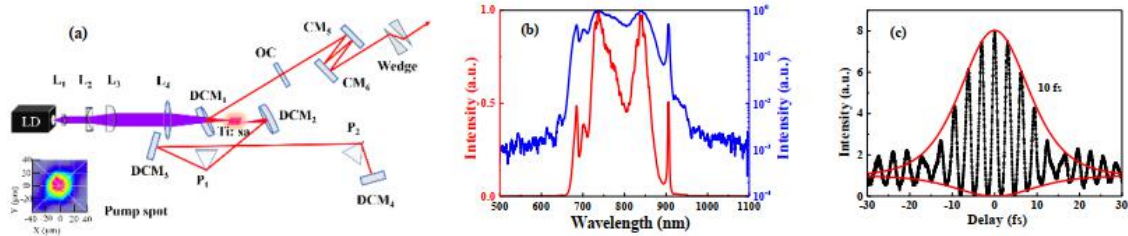


图 1.(a).实验装置图； (b).锁模光谱； (c).干涉自相关曲线

关键词： 激光二极管泵浦； 钛宝石； 克尔透镜锁模

参考文献

[1]. C. G. Durfee, T. Storz, J. Garlick, S. Hill, J. A. Squier, M. Kirchner, G. Taft, K. Shea, H. Kapteyn, M. Murnane, and S. Backus, "Direct diode-pumped Kerr-lens mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Express* **20**, 13677–13683 (2012).

[2]. S. Sawai, A. Hosaka, H. Kawauchi, K. Hirose and F. Kannari, "Demonstration of a Ti:sapphire mode-locked laser pumped directly with a green diode laser," *Appl. Phys. Express* **7**, 022702 (2014).

Q018

专题代号： Q

报告题目： 基于加速器的兆伏特超快电子衍射与超快电镜

报告人： 向导

单位： 上海交通大学

摘要：

粒子加速器在科学研究中一直发挥着重要作用。过去粒子加速器主要用于高能物理和核物理的研究（如对撞机）以及用于光子科学领域的研究（如基于加速器的同步辐射光源和自由电子激光）；近年来学术界对于利用加速器产生的高品质电子束直接进行超快科学的研究也表现出极大的兴趣。本报告将介绍超快电子衍射和超快电镜的基本原理，其在超高时空分辨研究中的典型应用，及上海交通大学在基金委国家重大科研仪器设备研制项目（部门推荐）支持下建设的兆伏特超快电子衍射与超快电镜的建设和运行情况。

Q019

专题代号: Q

飞秒强激光与分子相互作用动力学研究

赖炫扬, 余少刚, 孙仁平, 康会鹏, 全威, 柳晓军

中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071

Email: xylai@wipm.ac.cn

摘要:

随着激光器的发明以及激光技术的高速发展, 尤其是 80 年代啁啾脉冲放大技术的重大突破, 实验室可以获得脉冲宽度为飞秒量级的高强度激光。飞秒强激光与原子分子相互作用是实现原子分子超快成像及阿秒电子动力学调控的重要手段。我们围绕该研究方向开展了系统的理论与实验相结合的研究工作, 包括:

1. 发展分子库仑量子轨道强场近似理论, 准确描述分子超快电子动力学及其新奇量子效应, 包括二维光电子能谱的低能扇形结构和垂直极化方向的光电子谱的干涉结构等, 结合电子轨道分析, 揭示原子实库仑场和分子轨道波函数的对称性对原子分子超快电子动力学行为的影响机制。
2. 系统阐明分子超快电子动力学中分子结构效应, 提出基于强场电离的分子结构层析成像方案, 并实验演示其可行性。

关键词: 飞秒强激光, 量子轨道理论, 分子结构效应, 层析成像

参考文献

- 【1】 X. Y. Lai, C. Poli, H. Schomerus, and C. Faria, Phys. Rev. A 92, 043407 (2015)
- 【2】 X. Y. Lai, S. G. Yu, Y. Y. Huang, L. Q. Hua, C. Gong, W. Quan, C. Faria, and X. J. Liu, Phys. Rev. A 96, 013414 (2017)
- 【3】 R. P. Sun, X. Y. Lai, S. G. Yu, Y. L. Wang, S. P. Xu, W. Quan, and X. J. Liu, Phys. Rev. Lett. 122, 193202 (2019)

Q020

专题代号: Q

Effect of two-center interference on molecular ionization in different laser fields

Shilin Hu¹, Jing Chen², Xiaolei Hao³, Weidong Li³, Li Guo⁴, and Shensheng Han⁴

1 Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Metrology, School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China

2 Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088

3 Institute of Theoretical Physics and Department of Physics, Shanxi University, 030006 Taiyuan

4 Key Laboratory for Quantum Optics, Center for Cold Atom Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Email: chen_jing@iapcm.ac.cn

Abstract : By using a three-dimensional time-dependent Schrödinger equation (TDSE) in prolate spheroidal coordinates, we investigate the ionization dynamics of one-electron diatomic molecules in different laser fields. It is found that the ionization probability shows oscillatory behavior vs alignment angle for large internuclear distances, and the ionization probabilities of the molecules with different initial states ($1\sigma_g$ and $1\sigma_u$) oscillate out of phase vs internuclear distance, which can be ascribed to the low-energy electron interference comparing with SFA simulations. Furthermore, it is demonstrated that, the ionization probability decreases as a function of the alignment angle in tunneling ionization regime, while it ascends with the increase of orientation angle in multiphoton ionization regime for the internuclear distance $R=2$ a.u. Analysis indicates that the above intriguing feature can be attributed to the interference between the partial electron wave packets emitted from different atomic cores, which becomes evident at low laser intensity due to increased width of the initial mechanical momentum of the photoelectron at ionization moment.

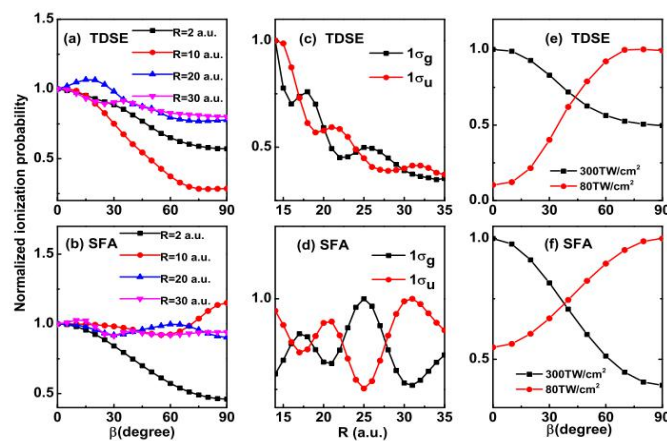


Fig. 1: Molecular ionization as a function of alignment angles and internuclear separations in different laser fields.

[1] Shilin Hu *et al*, Effect of two-center interference on molecular ionization in multiphoton ionization regime, OE 2017, 25, 23082.

[2] Shilin Hu *et al*, Effect of low-energy electron interference on strong-field molecular ionization, PRA 2016, 93, 023424.

[3] Shilin Hu *et al*, Impact of orbital symmetry on molecular ionization in an intense laser field (submitted).

National Basic Research Program of China (No. 2016YFA0401100), the NNSF of China (Nos. 11425414, and 11804405)

Q021

专题代号: Q

超快激光作用下原子受挫双电离研究

李盈宾、许景焜、赵奕光、汤清彬、余本海

信阳师范学院物理电子工程学院，信阳 464000

Email: liyingbin2008@163.com

摘要：利用蒙特卡罗经典轨迹方法^[1]，我们研究了超快激光脉冲作用下 Ar 原子受挫双电离（Frustrated Double Ionization, FDI），并对比了非次序双电离（Nonsequential Double Ionization, NSDI）情况。图 1 展示了经典模型描述下 NSDI 和 FDI 的能量轨迹及空间轨迹，很明显对于 NSDI，激光场结束后，两电子均获得了较高的能量从而脱离原子核的束缚；对于 FDI，只有一个电子获得了较高的能量并脱离原子核的束缚，而另一个电子获得了较低的能量最终仍然被原子核束缚。这次报告，我们拟重点介绍 FDI 的发生机制、发生条件以及与激光参数（波长/强度）的依赖关系，并借助直观的 Simpleman 模型理解我们的数值计算结果，从而使人们深入地认识 FDI 过程。

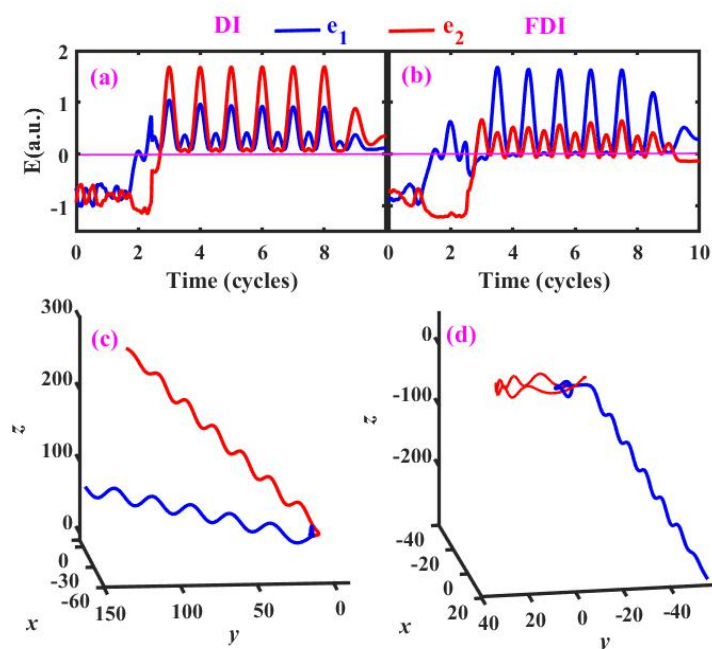


图 1 上排：两电子能量随着激光脉冲的演化，（a）为 NSDI，（b）为 FDI。

下排：两电子空间演化轨迹，（c）和（d）分别对应（a）和（b）。

关键词：超快激光 受挫双电离

【1】Yingbin Li, *et al.*, Transition of recollision trajectories from linear to elliptical polarization, *Optics Express* 2016, 24 (6), 6469-6479.

【2】Yingbin Li, *et al.*, Nonsequential double ionization with mid-infrared laser fields, *Sci. Rep.* 2016, 6, 37413.

基金项目：国家自然科学基金项目（NOs. 61475132, 11747077）

Q022

超强激光场中的光电效应

刘爱华、黎根亮、王宁月、王俊、费德厚、丁大军

吉林大学原子与分子物理研究所，长春 130012

Email: aihualiu@jlu.edu.cn

摘要：光电效应作为量子力学的发端，在进当代物理中有极其重要的地位。近年来，世界各地在努力发展新一代自由电子激光光源，光强可望达到 $10^{24}\text{W}/\text{cm}^2$ 。在这光强下，将会有许多新物理新效应被发现。比如原子稳定化[1]现象。在高频率超强的线偏振激光下，由于原子稳定化出现，光电效应会出现一些新的现象：氢原子只在激光脉冲的上升沿和下降沿发生电离并产生光电子波包[2, 3]。由于前后两个电离最大的时刻有着同样 Stark 能级移动，两列光电子波包产生干涉，从而在其光电子能谱上出现干涉条纹。这种现象被称为动态干涉[3]。

通过全维数值求解含时薛定谔方程，我们发现在基态氢原子在高频超高强度的圆偏振和椭圆偏振激光下也能观测到动态干涉现象。在一阶微扰理论中，椭圆偏振和圆偏振激光的光电子谱可以看成是其两个线偏振分量的光电子谱的叠加结果。在激光峰值强度小于 $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ ，椭圆偏振和圆偏振激光下基态氢原子的光电子谱依然基本满足这一规律，但对于更高的激光强度，比如 $5 \times 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ ，光电子动量谱及角分布变得复杂，需要用到高阶微扰进行修正。

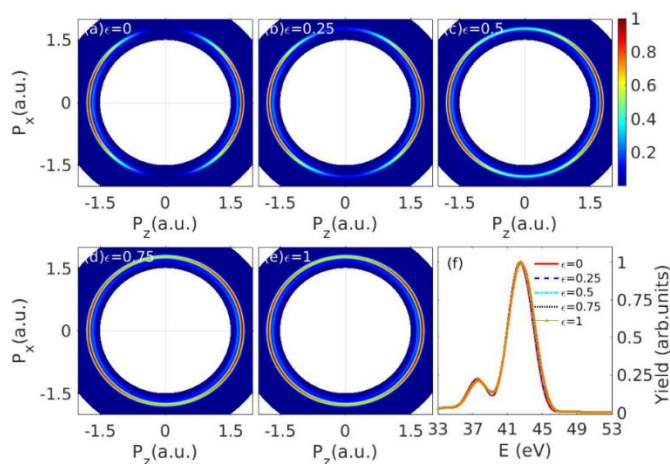


图 1 基态氢原子的光电离的光电子动量分布(a-e)和光电子能谱(f)。

关键词：光电效应，动态干涉，光电子谱，动量分布

参考文献

- 【1】 J. H. Eberly and K. C. Kulander 1993 *Science* **262**, 5137.
- 【2】 J. Guo, F. Guo, J. Chen and Y. Yang 2018 *Acta Phys. Sin.* **67**, 073202.
- 【3】 W. Jiang and J. Burgdörfer 2018 *Opt. Express* **26**, 19921.

基金项目：国家自然科学基金项目（NO. 11774131, 91850114, 11604119 和 11627807）。

瞬态光电测量技术及其应用

白永林, 朱炳利, 徐鹏

中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西省西安市高新区信息大道 17 号 710119

Email: baiyonglin@opt.ac.cn

摘要:

课题组基于放大的正弦信号, 产生用于条纹变相管的高重频扫描电路; 同时, 针对高频扫描信号对条纹相机系统的电磁干扰进行了屏蔽。通过对同步抖动的精确控制, 实现 150MHz 同步扫描条纹相机约 2 ps 的时间分辨, 并成功应用于荧光材料的 ASE 时间特性测量【1】。

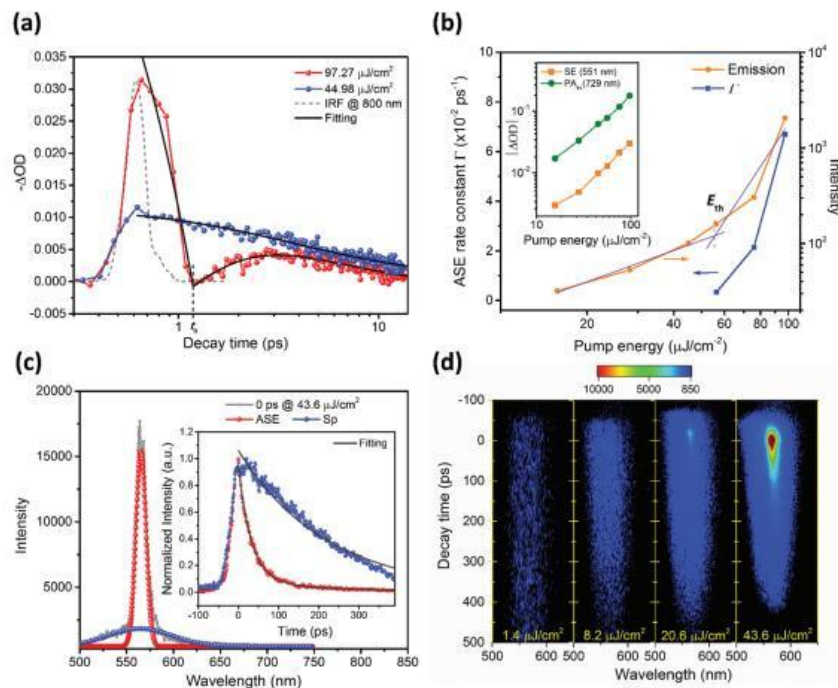


Figure 3. a) Solid lines with scatters are TA decays for the SE (551 nm) under different excitation energies, solid line is the corresponding fitting and dashed line is the IRF at 800 nm; b) emission intensity at ASE wavelength of the sample for TA measurement and the rate constant Γ obtained by the kinetic model as a function of pump energy. Inset shows the pump energy dependence of the TA signal for the SE and PA_n ; c) the transient PL spectrum and the fitted peaks assigned as the ASE component and the spontaneous emission (Sp) component at an excitation of 43.6 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. Inset shows their decays curve and the fitting by a single or double exponential function; d) streak camera patterns under different excitations.

关键词: 超快诊断 条纹相机

参考文献

【1】 Xuehong Zhou et al., Low Optical Loss Amplified Spontaneous Emission and Lasing in a Solution-Processed Organic Semiconductor, *Adv. Optical Mater.* 2019, 1900701.

Q024

专题代号：Q

中红外周期量级超强超短激光技术研究

冷雨欣, 彭宇杰, 李妍妍, 李儒新

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

lengyuxin@siom.ac.cn

摘要: 大能量周期量级中红外激光在环境、军事、医学和物理前沿研究等众多方面有着重要的应用, 尤其是在阿秒科学和高次谐波产生等强场物理科学领域能够驱动产生 keV 量级的单个阿秒脉冲而被广泛应用。结合强场物理研究的新需求, 发展非线性光学频率变换、光学参量啁啾脉冲放大、中红外宽带激光色散管理、基于空芯光纤的脉冲后压缩与相干合束、CEP 稳定控制、脉冲诊断、以及光场调控等系列中红外超强超短激光技术, 并建立了 1.5~5 μm 波段的大能量周期量级中红外激光系统, 可实现 20mJ/60fs/1.5 μm 、6mJ/105fs/4 μm 、2.6mJ/21.5fs/4 μm 等多种模式的输出能力, 进而开展了基于空芯光纤的相干合束和中红外涡旋光光场调控等研究。所发展的系列技术和激光系统可以用于驱动高次谐波、THz 等多种次级辐射等研究, 极大拓展强场物理研究范围。

关键词: 超快激光; 非线性光学; 中红外激光; 脉冲压缩

Q025

专题代号：Q

神光 II-5PW 超短超强激光装置的研制和物理打靶实验

郭爱林 谢兴龙 康俊 朱海东 杨庆伟 孙美智

朱坪 梁潇 高奇 崔自若 杨顺华 张栋俊 张诚 朱健强

中科院上海光机所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

Email: gal147@163.com

摘要:

飞秒拍瓦激光装置将能量在时间和空间上高度集中, 可以获得极高的功率密度, 为强场物理等前沿基础研究提供实验条件。我们依托现有的神光 II 激光装置作为泵浦, 自主研制了神光 II-5PW 激光装置, 并成功开展了超短超强激光全口径压缩聚焦的物理打靶实验。

神光 II-5PW 激光装置首先利用三级光参量放大器实现宽带啁啾脉冲的高效率放大, 激光束经空间滤波器扩束到 290mm \times 290mm 后注入到 360mm \times 565mm 的大尺寸光栅压缩器, 激光脉冲被全口径压缩到 30fs 以内, 注入到真空靶室后再由焦距为 800mm 的大口径离轴抛物面反射镜聚焦, 科学 CCD 实测靶点处光学焦斑直径小于 4.4 μm , 从而在靶点处获得了时间和空间尺度均接近物理极限的激光焦斑。

为了验证神光 II-5PW 激光装置的实用性和可靠性,我们在 2019 年 3 月与中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所联合开展了飞秒激光质子加速实验,在厚度为 $10\mu\text{m}$ 的铜靶后侧放置了 16 层 RCF 堆栈来检测质子强度,16 层 RCF 均检测到质子信号,对应质子强度超过 16MeV ,表明该装置的聚焦功率密度已超过 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ 。在 2019 年 7 月,完成了与以色列希伯来大学强场物理团队的中以合作飞秒激光等离子体研究项目的物理打靶实验。我们计划在 2019 年底开展与欧洲 ELI 装置的捷克和匈牙利两支物理研究团队的中欧合作项目。物理打靶实验表明神光 II-5PW 激光装置已实现稳定可靠运行,打靶成功率超过 90%,具备了在拍瓦量级开展强场物理实验的实用化能力。

有别于纳秒和皮秒高功率激光系统,实用化的超短超强飞秒拍瓦激光挑战的是科学和工程的极限,仅仅实现极高的功率指标而忽视其他参数性能,并不能具备物理打靶的实用化能力,因此当前国际上能够稳定运行、提供物理实验的飞秒拍瓦激光装置很少。

为了避免超强激光损坏昂贵的光学器件,基于安全可靠和实用化原则,神光 II-5PW 采取了分阶段实施的方案,首先实现拍瓦级激光的安全输出和物理实验的稳定可靠,然后致力于近场强度、光谱相位和强度、色差和波前像差、信噪比、光束稳定性、终端调焦瞄靶等关键技术指标的优化验证,在实用化和安全运行的前提下追求更高的功率输出。目前,该装置只利用了前 2 级参量放大器来获得 40J 的放大能量,后期将大尺寸 LBO 晶体安装到第 3 级参量放大器可获得 $150\text{J}/30\text{fs}/5\text{PW}$ 的到靶脉冲。

神光 II-5PW 装置的研制,使神光 II 综合实验平台兼备高能纳秒、皮秒拍瓦和飞秒拍瓦的多档脉冲激光输出能力,可灵活地实施独立打靶和多束联合打靶实验。近年来,实验室依托该平台对国内外强激光物理团队开放合作,提供可靠的物理实验平台,取得了诸多高水平的研究成果。今后,神光 II-5PW 装置将成为实验室对外开放合作的重要平台。

关键词: 神光 II-5PW, 飞秒拍瓦, 超短超强激光

参考文献

- 【1】 Jianqiang Zhu *et al*, Analysis and construction status of SG-II 5PW laser facility, High Power Laser Science and Engineering, (2018), Vol. 6, e29, 13 pages.
- 【2】 Jianqiang Zhu *et al*, Status and development of high-power laser facilities at the NLHPLP, High Power Laser Science and Engineering, (2018), Vol. 6, e55, 23 pages.

Q026

专题代号: Q

Quantum interference effect in atomic double ionization in intense laser field

Jing Chen

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing

Abstract: In previous studies on atomic non-sequential double ionization (NSDI) process in intense infrared laser field, quantum interference effect has eluded experimental observation and the NSDI can be well understood from a semiclassical perspective. Recent progress in experimental technique makes it possible to measure the process more accurately and reveal new effect related to quantum interference effect in the NSDI process. In this talk, we report some of our recent work on the quantum interference effect in atomic double ionization process.

We perform coincidence measurements of the momenta of the doubly charged ion and the two

electrons arising from NSDI of xenon subject to midinfrared laser pulses at 2400 nm. It is found that the intensity dependence of the asymmetry parameter between the yields in the 2nd and 4th quadrants and those in the 1st and 3rd quadrants of the electron-momentum-correlation distributions (i.e., asymmetry between side-by-side and back-to-back emission) exhibits a peculiar fast oscillatory structure, which is beyond the scope of the semiclassical picture. Our theoretical analysis using the S-matrix theory indicates that this oscillation can be attributed to interference between the contributions of different excited states in the RESI channel and interference between different return trajectories. Our work provides solid evidence that quantum interference plays a pivotal role in the NSDI process [1].

Moreover, we show that the doubly differential cross sections (DDCSs) of the target ions, e.g., Ar⁺ and Xe⁺, can be accurately extracted from the 2-dimensional photoelectron momentum distributions measured in the NSDI process of the corresponding atoms. The extracted DDCSs exhibit interference structures strongly dependent on both the target and the laser intensity, in good agreement with calculated DDCSs from the scattering of free electron on the corresponding ions. Based on this work, we propose a novel laser-induced inelastic diffraction (LIID) scheme which may be extended to molecular systems and provides a promising approach for the imaging of the gas-phase molecular dynamics induced by a strong laser field with unprecedented spatial and temporal resolution [2].

Key Words: Nonsequential double ionization, strong laser field, interference

References

[1] W. Quan, et al., Phys. Rev. A 96, 032511 (2017).

[2] W. Quan, et al., Phys. Rev. Lett. 119, 243203 (2017).

Q027

专题代号: Q

动态色差预补偿方式消除 SGII-5PW 系统色差的研究与进展

康俊*, 谢兴龙, 郭爱林, 崔自若, 朱坪, 朱海东, 杨庆伟, 孙美智, 梁潇, 高奇, 朱健强

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

kangjun@siom.ac.cn

关键词 超短超强激光; 宽带激光; 信噪比; 色差补偿; PTD; 焦斑

摘要

SGII-5PW 是以 SGII 装置为泵浦光来源, 以全 OPCPA 放大方式得到 5PW 高功率超短脉冲输出的装置, 中心波长为 808nm。信号光经三级 OPCPA 放大, 光束逐级扩束扩束至 290mm*290mm 进入压缩室, 由于啁啾信号带宽宽 (750mm-850mm), 光束口径大, 由多级扩束空间滤波器的各级透镜累计引入的 PTD 达到 388fs, 而由色差引起的焦点位置的离焦量达到 ±0.4mm (750mm-850mm), 终端焦斑尺寸测得为 32 μm*18 μm, 对靶场焦斑的功率密度的影响很大。

在 SGII-5PW 装置中, 我们提出了一种可动态精确调节色差预补偿量的装置。通过在系统光路中预添加一个可调节色差补偿量的装置, 使得在终端靶场的色差量得到完全补偿。装置中以 1/4 波片, 偏振

棱镜与反射镜（非球面反射镜）构成双程补偿光路，以两块正透镜为色差预补偿透镜，与输入负透镜共同组成共焦像传递系统，装置除按系统的设计补偿大的色差量外，装置还可通过调节焦点离补偿透镜距离和两块补偿透镜间的距离在线调节色差小的失调量。该色差预补偿单元具有体积小，成本低，具备完全补偿系统色差并可在线精确细调的特点，并满足像传递的条件。

该单元具备动态调节色差预补偿量的功能，可实现全系统色差的动态精确补偿，系统色差经补偿后，SGII-5PW 装置终端聚焦焦斑得到显著改善：焦斑尺寸接近衍射极限 $\sim 4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ （半高全宽），在靶点处我们获得了时间与空间尺度接近物理极限的激光焦斑。在随后进行的 SG-II 5PW 系统质子加速实验，质子产额超过 16MeV，也验证了装置具备终端焦斑功率密度超过 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ 的输出能力。

参考文献

- [1] J. Q. Zhu, X. L. Xie, Q. W. Yang, et al. Introduction to SG-II 5 PW laser facility[C]// 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 5-10 June 2016, San Jose, CA, USA. 1-2.
- [2] W. Li, Z. Gan, L. Yu, et al. 339J high-energy Ti:sapphire chirped-pulse amplifier for 10PW laser facility[J], Optics Letter, 2018, 43(22): 5681-5684.
- [3] Cui, Z.R, Kang, J, Guo, A.L, et al.. (2019). Dynamic chromatic aberration pre-compensation scheme for ultrashort petawatt laser systems[J], Optics Express, 2019, 27(12):16812-16822.
- [4] 朱坪, 谢兴龙, 焦兆阳, 等. 大口径超短脉冲聚焦系统波前误差对时间信噪比的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(10):322-328.
- [5] 崔自若, 康俊, 谢兴龙, 等. 利用变焦像传递系统实现飞秒拍瓦激光系统色差的精确补偿[J], 中国激光, 2019, 网络发表(已收录)

基金项目：科技部国家重点研发计划（NO.2016YFB0402105）。

Q028

专题代号：Q

飞秒激光驱动气体辐射太赫兹波的优化控制

王国利、周效信

西北师范大学，兰州 730070

Email: wanggl@nwnu.edu.cn

摘要：获得高强度的太赫兹波对于太赫兹技术的运用非常关键。在利用飞秒激光诱导气体等离子体辐射太赫兹波的方法中，驱动组合激光场的众多参数（相位延迟、强度比、频率比、偏振态）都会对最终产生太赫兹波的强度、频率和偏振态产生重要影响。因此，为了获得所需的太赫兹波，优化和调控这些激光参数就显得尤为必要。

对于倍频线极化组合激光场，在给定激光总强度和基频波长的情况下，我们的优化表明，选择合理的强度比、波长和相位，可以明显增强电子的电离几率以及增大电子的漂移速度，从而提高太赫兹辐射的强度。而且还发现，在一定的条件下， $\omega+4\omega$ 也可成为一种理想的驱动场方式。

我们的模拟表明，采用非严格倍频组合场可以产生中心频率可调的太赫兹辐射，通过优化选择激光参数，可以显著提高特定频率附近的太赫兹发射。

我们提出了利用由圆极化激光和线极化激光组成的双色非倍频组合场来产生可控偏振态太赫兹波的方案。模拟结果表明，采用此类驱动激光场辐射的太赫兹波强度相比单色圆偏振激光场有了大幅度提高，而且更易控制太赫兹波的偏振态。通过采取合理的组合场中线极化激光脉冲的波长、强度和相位等参数，可以产生极化方向可控的线偏振、椭圆偏振和圆偏振太赫兹波。

关键词：飞秒激光 太赫兹波 优化控制

基金项目：国家自然科学基金（NO. 11864037）、西北师范大学基金（NO. NWNNU-LKQN-17-1）。

Q029

专题代号：Q

倾斜光纤光栅技术及在超快光纤激光器中的应用

王虎山、王屹山、闫志君、张伟、赵凤艳

中国科学院西安光学精密机械研究所，瞬态光学与光子技术国家重点实验室
西安市高新区信息大道17号，710119

Email: wanghs@opt.ac.cn

摘要：光纤光栅作为一种光学无源器件，具有全光纤结构、体积小、插损小、易于集成、极化不敏感、抗干扰、耐腐蚀等优点，同时可起到滤波、色散补偿、温度/应力/折射率响应、光反射等作用，被广泛应用于光纤通信、光纤激光及光纤传感系统中，对于光纤光学研究领域的发展具有重要意义。其中，倾斜光纤光栅尤其是45度倾斜光纤光栅以及大角度倾斜光纤光栅展现了新颖的功能及特点，在超快光纤激光技术具有较大的应用潜力和价值，成为近年来研究的热点。

课题组团队基于紫外光掩模板扫描技术搭建了光纤光栅刻写平台，实现了多种倾斜光纤光栅的研制。深入研究了倾斜光纤光栅偏振及模式耦合特性，并基于该类光栅设计了全光纤滤波器及色散管理器件。率先开展了系列倾斜光纤光栅在光纤激光技术中的应用研究，包括：利用45度倾斜光纤光栅实现了单偏振耗散孤子脉冲输出，输出激光偏振度高达26 dB，有利于提高光纤放大系统的偏振度及传输效率；基于45度倾斜光纤光栅滤波器实现了传统孤子脉冲的光谱整形以及双波长、多波长光纤激光，其中多波长激光在3 dB范围内的波长数高达82个，信噪比为33 dB；设计了基于大角度倾斜光纤光栅的全光纤可饱和吸收锁模器件，可承受较高的激光功率并具有良好的可靠性，采用该器件实现了激光器稳定锁模运转。

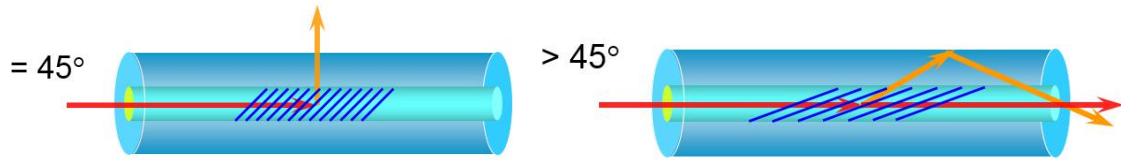


图 1 45 度倾斜光纤光栅及大角度倾斜光纤光栅结构

关键词：倾斜光纤光栅 激光器锁模 超短脉冲激光

参考文献

- 【1】 H. S. Wang *et al.*, Excessively tilted fiber grating based Fe_3O_4 saturable absorber for passively mode-locked fiber laser, *Opt. Express*. 2019, 27 (11), 15693.
- 【2】 H. S. Wang *et al.*, All-fiber polarization interference filter based uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser, *Laser Physics*. 2019, 29 (5), 055105.
- 【3】 Z. J. Yan *et al.*, Theoretical and experimental analysis of excessively tilted fiber gratings, *Opt. Express*. 2016, 24 (11), 12107.

基金项目：国家自然科学基金项目（61605239，61690222），国家重点研发计划（2016YFF0200700，2017YFB1104400），中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作计划。

Q030

专题代号：Q

偏振调制光场下 N_2^+ 激射行为

李贺龙，徐淮良

吉林大学 原子与分子物理研究所，长春 130012

Email: helongli@jlu.edu.cn

摘要： 超快强场激光诱导大气组分产生激射，因在大气传感、气体管道检漏等领域拥有良好的应用前景而受到广泛的关注。目前，两种大气组分，氮气和氧气，在强激光激励下均可以发生粒子数反转，产生前向或后向相干辐射。增益介质可为氧原子、氮原子、氮分子以及氮分子离子(N_2^+)等。目前，前三种激射行为的物理机制已基本被澄清。然而，关于 N_2^+ 光增益形成的物理机制尚在争论之中。最近，我们在利用偏振调制的激光脉冲诱导 N_2^+ 产生相干辐射时，发现其光增益得到了显著的增强。通过侧向荧光分析和理论模拟，增强原因被归结为 N_2^+ 基态 X 与激发 A 态之间耦合作用增强。该项工作不仅提供了一种有效地调节 N_2^+ 光增益的实验方案，而且为理解 N_2^+ 增益产生的物理机制提供了数据支持。

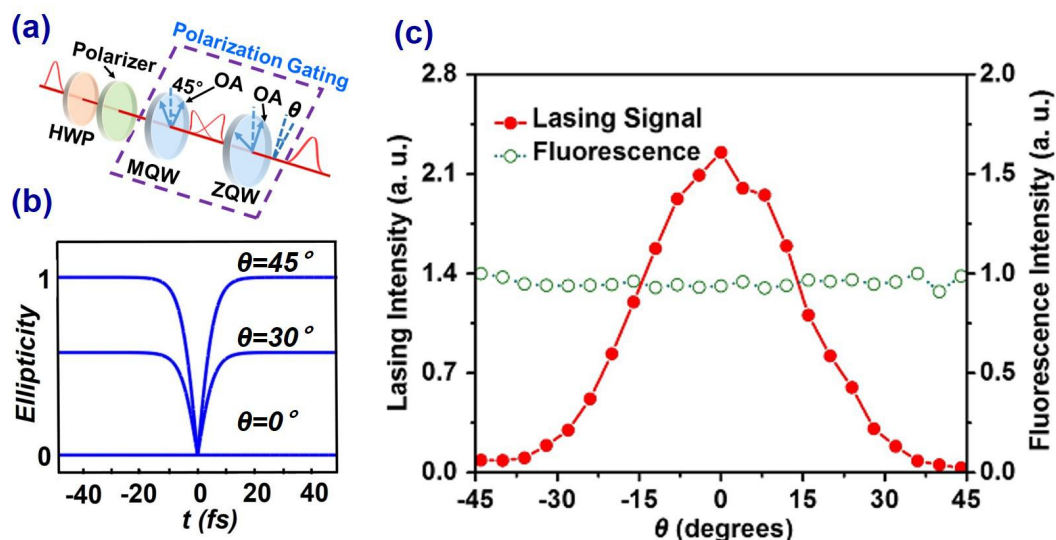


图 1 (a) 利用偏振门技术调制激光脉冲内偏振态的实验装置,其中 HWP:半波片; MQW:多级 $\lambda/4$ 波片; ZQW:零级 $\lambda/4$ 片; OA:光轴; θ : 两波片光轴间夹角. (b) 在 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时脉冲内偏振态分布. (c) 不同 θ 条件下 N_2^+ 的 391nm 荧光和激射强度.

关键词: 氮分子离子激光 粒子数反转 光耦合

参考文献

- 【1】H. L. Xu et al., Sub-10 fs population inversion in N_2^+ in air lasing through multiple state coupling, *Nat. Comm.* 2015, 6 9347.
- 【2】H.L. Li et al., Significant enhancement of N_2^+ lasing by polarization-modulated ultrashort laser pulses, *Phys. Rev. Lett.* 2016, 122 013202.

Q031

专题代号: Q

Recent advances in extremely high speed videography on the atomic time scale

Li Jingzhen Xu Shixing Cai Yi Zhang Xiuwen

Lu Xiaowei Zeng Xuanke Chen Hongyi

Institute of Photonic Engineering

College of Physics & Opto-electronic Engineering, Shenzhen University

Shenzhen Key Lab. of Micro·Nano Photonic Information, Shenzhen, China

Physics, chemistry and biology are the same at the atomic level, studying how atoms behave, and the period of atomic motion is on the order of femtoseconds. Extremely high speed videography on the atomic scale is a powerful tool for studying intra- and inter-atomic/molecular dynamics in photonic material, plasma

physics, living cells, and neural activity. Pushing the imaging speed to the quantum limit could reveal extraordinary scenes about the questionable quantization of life and intelligence, or the wave-particle duality of light. However, previous designs of ultrafast photography are intrinsically limited by framing speed and spatial resolution.

Here, we introduce a new technique based on a multiple non-collinear optical parametric amplifier principle (MOPA), which readily push the frame rate into the area of 1.5×10^{13} fps with higher spatial resolution than 30 lp/mm. The MOPA imaging has been applied to record the femtosecond early evolution of laser-induced plasma grating in air and the optical ring-shape lattice with a rotating cycle down to femtosecond region for the first time. Our approach avoids the intrinsic limitations of Heisenberg's uncertainty principle of previous techniques, thus can be potentially optimized for higher speed and resolution, opening the way of approaching quantum limits to test the fundamentals.

Meanwhile, in view of recently existing conception inconsistency or rather confusion in the high speed photography field, it is necessary to briefly explain the information theory on high speed imaging presented and deduced firstly by Dr. Schardin, German scientist, who is referred to as a pioneer in a high speed photography field.

Q032

专题代号: Q

Orientation-dependent depolarization of supercontinuum in barium fluoride crystal

Cheng Gong^{1*}, Zixi Li^{1,2}, Linqiang Hua¹, and Xiaojun Liu^{1#}

1State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China

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

Email: *gongcheng@wipm.ac.cn, #xjliu@wipm.ac.cn

Keywords: filamentation, supercontinuum, depolarization

Supercontinuum generation in transparent media including gases, liquids and solids has been a hot research area since it was first discovered by Alfano and Shapiro in 1970 [1]. Much attention has been paid to investigate the physical mechanism of supercontinuum generation due to its wide range of potential applications in various research fields [2]. Apart from concentrating on generating broader supercontinuum spectra, much attention has also been paid to the polarization properties of the supercontinuum due to its important role in spectroscopic applications. Usually, when supercontinuum is generated in isotropic amorphous media, the polarization is believed to be the same as the incident laser [1]. However, when intense laser pulses propagate in BK7 glass, it has been found that the polarization of the generated supercontinuum could be different from the incident laser [3], which was described as the depolarization of the supercontinuum. In that work, the depolarization of the supercontinuum was attributed to the scattering of the generated plasma. In contrast, Yu et al. recently found that the polarization of the supercontinuum could also be changed by the initial polarization perturbation induced by the focus lens and this depolarization can be magnified by the cross-phase modulation of the nonlinear third-order polarization [4]. Therefore, whether the generated plasma

play an indispensable role in the depolarization of the supercontinuum is still under controversial and more experimental investigations on the polarization properties of the supercontinuum are quite necessary.

In this work, we study the depolarization properties of the supercontinuum accompanied with femtosecond laser filamentation in the cubic BaF₂ crystal at various input laser energies and crystal orientations. It is found that the depolarization of the supercontinuum is strongly dependent on the crystal orientations. At the same time, the depolarization of the supercontinuum changes with the increasing of the input laser energies due to the scattering of the generated plasma and finally saturates due to the intensity clamping effect at most crystal orientations. Moreover, a linearly polarized supercontinuum which has the same polarization of the incident laser can be obtained even at high input laser energies when the crystal orientation is chosen as 45 degree in BaF₂ crystal. Our experimental results reveal the critical role of ionization-induced plasma in the depolarization properties of the supercontinuum accompanied with femtosecond laser filamentation in cubic crystals.

Acknowledgments: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11527807, No. 11674356), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDB21010400) and the Open Fund of the State Key Laboratory of High Field Laser Physics.

References:

- [1] R. R. Alfano, et al., Phys. Rev. Lett. **24**, 584 (1970). [2] A. Dubietis, et al., Lith. J. Phys. **57**, 113 (2017).
[3] A. K. Dharmadhikari, et al., Opt. Lett. **31**, 2184 (2006). [4] J. Yu, H. et al., Opt. Express **18**, 12581 (2010).

Q-P001

专题代号: Q

少层 MoS₂ 激子动力学的高压调控

李庆仪¹²、隋来志³、姜远飞¹²、陈安民¹²、袁开军³、金明星^{12*}

吉林大学原子与分子物理研究所, 长春, 130012

吉林省应用原子分子光谱重点实验室, 长春, 130012

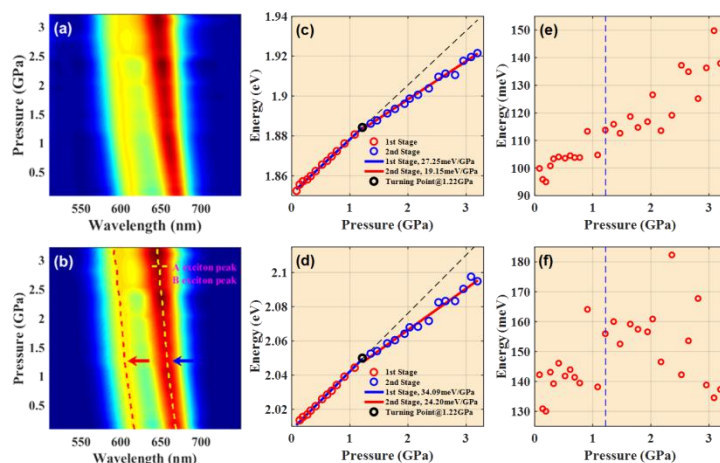
中国科学院大连化学物理研究所分子反应动力学国家重点实验室, 大连, 116023

Email: jinmx@jlu.edu.cn

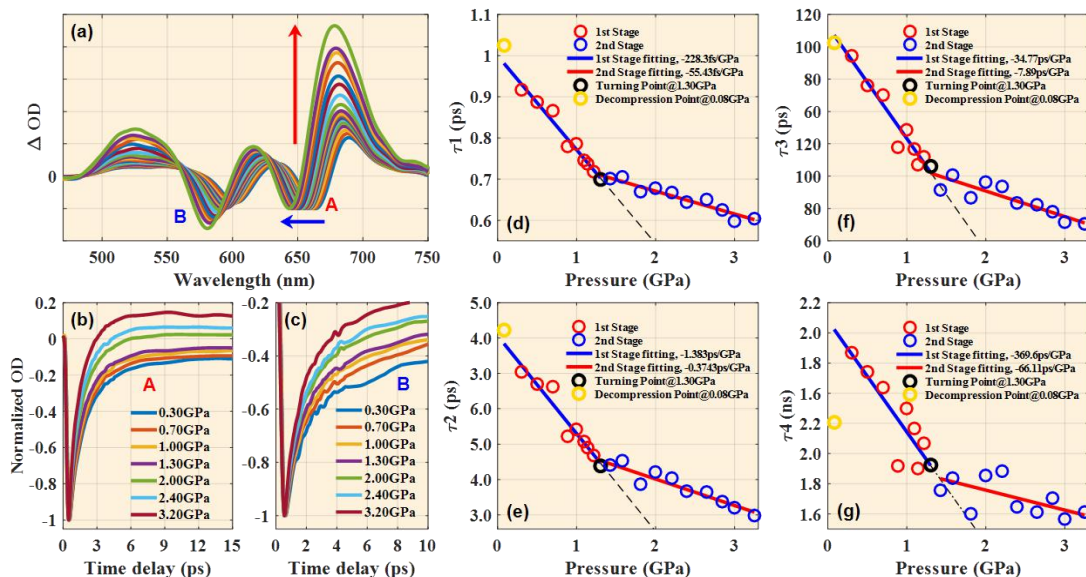
摘要:

通过超声液相剥离手段制备少层 MoS₂ 样品, 利用金刚石对顶砧压机装置产生高压环境, 研究压力对 MoS₂ 这种典型二维过渡金属硫化物的带隙结构及光电性质的调控能力。通过高压稳态吸收光谱手段发现, 随着压力升高, MoS₂ 直接带隙扩大, A、B 两激子吸收峰线性蓝移; 经过 1.22GPa 拐点后, 线性蓝移速率减慢, 泄压后激子吸收峰位置完全恢复。在此基础上, 将金刚石对顶砧压机耦合入自行搭建的飞秒宽带瞬态吸收光谱探测系统, 利用倍频产生的 400nm 飞秒脉冲作为泵浦光, 基频光聚焦到蓝宝石上产生 450nm-750nm 超连续白光作为探测光, 对不同压力下 MoS₂ 的激发态弛豫动力学进行了系统研究。通过全局拟合方法将 MoS₂ 激发态弛豫过程分解为四部分, 分别得到了各超快过程寿命随压力变化

曲线。结果发现，压力增大，过程变快，寿命变短，寿命-压力曲线在约 1.3GPa 前后分为两个线性阶段，与稳态吸收谱出现的拐点相应，且泄压后寿命恢复。通过分析可推测，在拐点处，MoS₂ 导带底位置发生交叉易位，激子-声子相互作用发生改变，从而对 MoS₂ 的激发态弛豫动力学产生影响。通过上述研究可知，压力对于 MoS₂ 等典型二维过渡金属硫化物的带隙结构及光学性质的调控十分有效，容易操作且精度高，对于深入揭示二维材料内部物理性质与带隙结构间的关联以及由此探索对材料功能的优化提高都有十分重要的意义。



图一、 高压稳态吸收



图二、 高压瞬态吸收

关键词： 二维过渡金属硫化物， MoS₂， 高压， 稳态吸收， 瞬态吸收。

资助项目： 国家自然科学基金（11674124）

参考文献

Q-P002

专题代号: Q

基于气体高次谐波的光发射电子显微镜

郑伟、汪洋、吴成印

北京大学物理学院, 北京 100871

Email: cywu@pku.edu.cn

摘要: 同时具有超快时间分辨和超小空间分辨的微纳光电器件表征新技术是当今科学与技术的前沿领域,也是发展下一代光电子信息功能器件产业的迫切需求,具有重要的科学意义和应用前景。基于飞秒强激光场与气体原子分子相互作用产生的高次谐波,其光子能量可覆盖真空紫外波段和软x射线波段,具有很好的时间相干性。它可以克服所有材料的逸出功,将材料的电子电离,而且可以覆盖整个布里渊区。光发射电子显微镜利用光电效应将电子电离,经过一系列电磁透镜/静电透镜,将电离光电子投射到探测器上,据此成像的光电子具有很高的空间分辨($<10\text{nm}$)和能量分辨($<150\text{meV}$)。北京大学物理学院解决了气体高次谐波单一级次谐波的筛选以及与光电子发射显微镜的互联问题,发展出基于气体高次谐波的光发射电子显微镜技术,同时融合光学泵浦-探测的超高时间分辨和光发射电子显微镜的超高空间分辨能力。目前已测量到单一级次谐波入射到固体表面和微纳结构产生的光电子的空间分布和能量分布,实现固体表面和微纳结构电子的超高空间分辨和能量分辨测量。下一步建设飞秒泵浦-高次谐波探测系统,进一步实现固体表面和微纳结构电子的超高时间分辨测量。

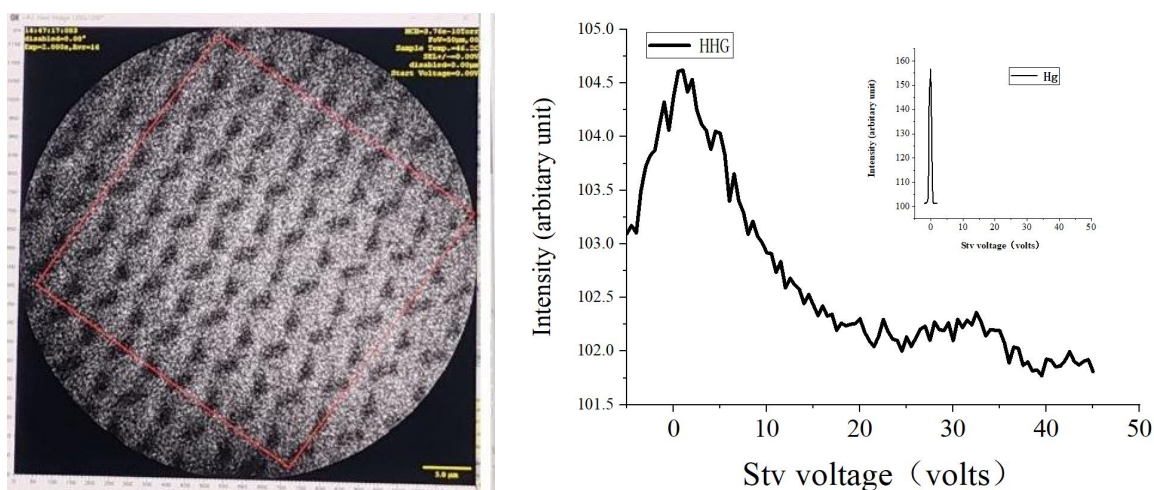


图 1: 波长 800 纳米的飞秒激光与惰性气体原子氙产生的 23 阶谐波与光发射电子显微镜结合, 左图: 空间分辨图像 (Si 样品), 右图: 能量分辨测量 (Au 样品)。

关键词: 高次谐波, 光发射电子显微镜, 微纳结构

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2018YFA0306302) 和国家自然科学基金 (No. 11625414)。

气流对飞秒激光成丝诱导光发射的影响研究

李苏宇、金明星

吉林大学原子与分子物理研究所，长春 130012
吉林省应用原子与分子光谱重点实验室(吉林大学)，长春 130012
Email: sylee@jlu.edu.cn

摘要：飞秒激光成过程中产生的荧光、超连续谱、太赫兹、高次谐波等发光现象在是飞秒激光成丝的最直接的应用，但是它们的寿命很短。在本章中，我们开展了飞秒激光脉冲在气流中的成丝实验，首次观察到了飞秒激光成丝诱导的等离子体喷焰，这一研究表明在飞秒激光成丝结束后的较长时间内依然存在发光行为。通过对发光光谱的时间-空间测量，在空气气流中，发光现象的主要来源于氧产生的超连续谱，其持续时间为 $50 \mu\text{s}$ 左右；而在纯氮气气流中，发光现象则来源于氮荧光发射，其持续时间长达数百微秒。它们都远远长于飞秒激光成丝过程产生的等离子体的寿命。这项工作揭示了在飞秒激光成丝中存在着“长寿命”的发光行为，有助于加深对飞秒激光成丝这一现象的认识。

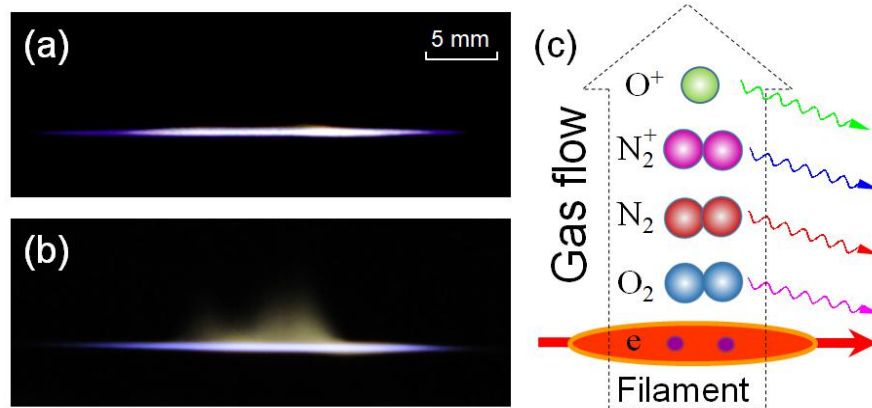


图 1. 飞秒激光脉冲在(a) 空气和(b)向上的气流（气流速度 100 m/s）中成丝。(c) 图 1(b)中飞秒激光成丝诱导“火焰”的原理示意图。

关键词：飞秒激光，荧光，氮分子

本工作获自然科学基金项目（11704145，11674124）支持。

参考文献

- 【1】 S. Y. Li, F.M. Guo, Y. Song, A. M. Chen, Y. J. Yang and M. X. Jin, *Physical Review A* 2014,89, 023809
 【2】 S. Li, A. Chen, Y. Jiang, and M. Jin, *Optics Communications* 2018, 426, 105
 【3】 S. Li, Y. Li, Z. Shi, L. Sui, H. Li, Q. Li, A. Chen, Y. Jiang, and M. Jin, *Spectrochimica Acta Part A* 2018, 189, 32

Q-P004

专题代号: Q

双种子光对氮气分子离子超荧光的调制

缪志明、郑伟、汪洋、戴晨、吴成印

北京大学物理学院, 北京 100871

Email: cywu@pku.edu.cn

摘要: 空气激光在大气遥感探测领域有着重要的潜在应用, 氮气分子离子超荧光作为类空气激光也受到了研究者的广泛关注。我们以前的实验结果表明, 对于波长 800 nm 的飞秒激光电离的氮气分子, 当注入波长 391nm 或者 428nm 的外部种子光时, 会引起氮气分子离子超荧光辐射, 种子光会得到两个数量级以上的放大。如图 1 所示, 391 纳米和 428 纳米分别对应氮气离子 $B^2\Sigma_u^+(v'=0) \rightarrow X^2\Sigma_g^+(v=0)$ 和 $B^2\Sigma_u^+(v'=0) \rightarrow X^2\Sigma_g^+(v=1)$ 跃迁。

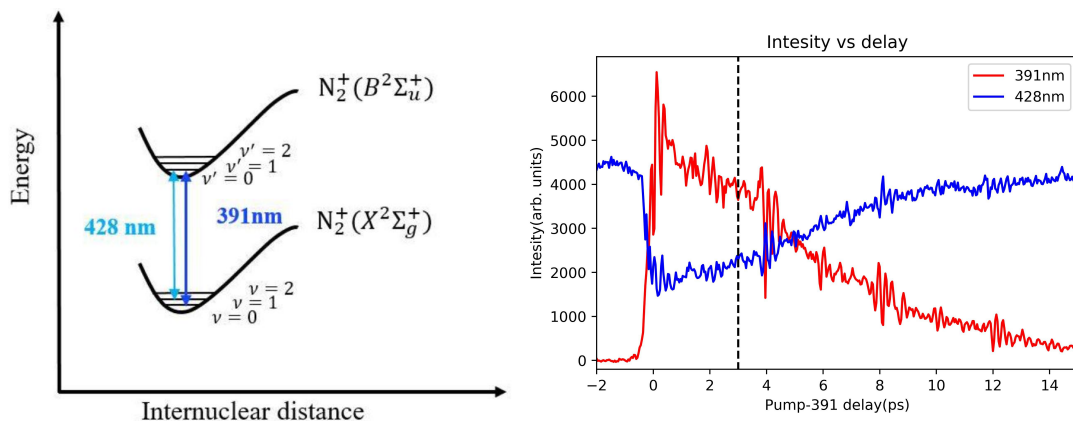


图 1: (左图) 氮气分子离子能级示意图, (右图) 固定 800 纳米泵浦光与 428 纳米种子光之间的延时 (如图中虚线所示), 扫描泵浦光和 391 纳米种子光之间延时获得氮气分子离子超荧光强度。

为了进一步探测外部种子光对氮气分子离子超荧光的影响, 我们在波长 800nm 飞秒激光电离氮气分子体系中, 同时注入 391nm 和 428nm 两束种子光, 需要指出的是氮气分子离子 391nm 和 428nm 辐射共享同一个上能级 $B^2\Sigma_u^+(v'=0)$ 。图 1 右图是固定 428nm 种子光, 虚线代表其与 800nm 种子光之间的延时。然后扫描 391nm 种子光, 同时测量 428nm 附近和 391nm 附近氮气分子离子超荧光辐射强度。实验结果表明, 随着 391nm 种子光的注入, 428nm 附近的超荧光强突然减弱, 伴随的是 391nm 附近超荧光强度的突然增强。随着 391nm 种子光延时的增加, 428nm 附近的超荧光强度逐渐恢复, 而 391nm 附近的超荧光强度逐渐减弱。结合理论分析, 上述实验结果可以归结于种子光引起的氮气分子离子能级布居以及能级间相干性的影响。

关键词: 空气激光, 氮气分子离子, 超荧光

基金项目：国家自然科学基金项目（Nos. 11625414, 21673006）

Q-P005

专题代号：Q

Third-harmonic generation and scattering in combustion flames using a femtosecond laser filament

Hongwei Zang¹, He-Long Li¹, and Huailiang Xu^{1,2,*}

¹State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China

²State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062,
China

*E-mail : huailiang@jlu.edu.cn

Abstract

Coherent radiation in the ultraviolet (UV) range has high potential applicability to the diagnosis of the formation processes of soot in combustion because of the high scattering efficiency in the UV wavelength region, even though the UV light is lost largely by the absorption within the combustion flames. We show that the third harmonic (TH) of a Ti: sapphire 800 nm femtosecond laser is generated in a laser-induced filament in a combustion flame and that the conversion efficiency of the TH varies sensitively by the ellipticity of the driver laser pulse but does not vary so much by the choice of alkanol species introduced as fuel for the combustion flames. We also find that the TH recorded from the side direction of the filament is the Rayleigh scattering of the TH by soot nanoparticles within the flame and that the intensity of the TH varies depending on the fuel species as well as on the position of the laser filament within the flame. Our results show that a remote and in situ measurement of distributions of soot nanoparticles in a combustion flame can be achieved by Rayleigh scattering spectroscopy of the TH generated by a femtosecond-laser-induced filament in the combustion flame.

Keywords: Soot; Third harmonic (TH); Femtosecond laser; Filament; Flame.

Q-P006

专题代号：Q

基于 R 矩阵方法的光电离时间延迟计算

刘金磊、孙佳雨、赵晶、吴建华、赵增秀、袁建民

国防科技大学文理学院物理系，长沙 410073

Email: liujinlei@nudt.edu.cn

摘要：利用 R 矩阵方法，我们系统分析了 Ne 的光电离时间延迟，得到 2p 轨道和 2s 轨道光电离的时间延迟为 24.75as，与实验上 21 ± 5 as 的结果符合的很好。

阿秒技术的发展使得在对超快电子动力学过程的进行阿秒尺度的观测和控制成为可能。近年来，利用阿秒条纹相机或 RABBIT 技术，人们在实验上已经对惰性气体原子和小分子的光电离时间延迟进行了广测量。理论上，基于 Eisenbud-Wigner-Smith(EWS)时间延迟的概念，人们采用不同理论方法计算得到了不同原子分子光电离时间延迟，但实验和理论结果仍然存在较大偏差【1】。

利用 R-matrixI 程序包【2】，我们计算了 Ne 原子的光电离时间延迟。与随机相位近似（RPA）方法相比，通过考虑组态相互作用和价实关联，R 矩阵方法计算得到的光电离截面中包含自电离共振结构等更多信息。基于 EWS 时间延迟，从 R 矩阵计算得到的不同通道的相移可以提取光电离时间延迟。如图 1 所示，比较了 R 矩阵和 RPA 计算得到的光电离时间延迟随光子能量的变化。当光子能量为 106eV 时，2p 和 2s 壳层光电离时间延迟的差别为 24.75as，与实验结果 21 ± 5 as 结果符合的很好【3,4】。

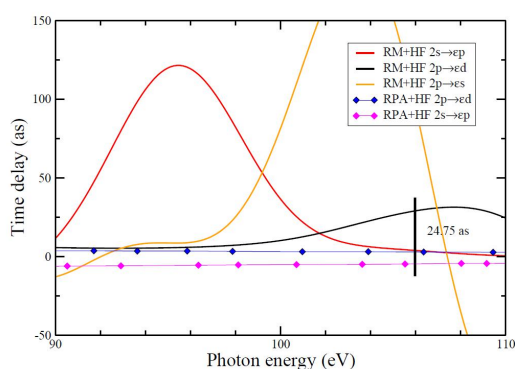


图 1 R 矩阵和 RPA 方法计算得到的光电离时间延迟比较

关键词：光电离、时间延迟、R 矩阵

参考文献

- 【1】 R. Pazourek, S. Nagele, and J. Burgdörfer, Attosecond chronoscopy of photoemission, Rev. Mod. Phys. 2015, 87, 765.
- 【2】 K. A. Berrington, et. al., R-MATRIX1: Belfast atomic R-matrix codes, Comput. Phys. Commun. 1995, 92, 290.
- 【3】 M. Schultze, M. Fieß, N. Karpowicz et. al. “Delay in Photoemission”, Science 2010, 328,1658.
- 【4】 A. S. Kheifets, “Time delay in valence-shell photoionization of noble-gas atoms”, Phys. Rev. A 2013, 87, 063404.

基金项目：国家自然科学基金项目（NO. 11904400）

Q-P007

Clean intense sub-10-fs pulses at 400 nm generated and measured

Fan Xiao, Li Wang, Xiaohui Fan, Xiaowei Wang*, Zengxiu Zhao*

Department of Physics, National University of Defense Technology, Hunan, Changsha 410000;
Email: Xiaowei.wang@nudt.edu.cn

Abstract: During the development of ultra-short pulses in recent years, the duration of laser pulse gradually decreased from femtosecond to attosecond^[1-3]. The ultraviolet few-cycle intense femtosecond laser pulses have many characteristics such as strong electric field, wide spectrum and ultra-short time resolution. Also, ultra-short laser pulses have been widely applied to various domains such as physics, chemistry and biology, providing microscopic insights into atoms, molecules and materials, chemical and biochemical reaction processes^[4-6].

Clean 9.107 fs pulses at 400 nm with 180 mJ energy were obtained by spectral broadening in a hollow fiber, where several chirped mirrors are used to dispersive compensate. The self-diffraction signal shows a smoothed and broadened laser spectrum, it allow us to generate near Fourier transform limited pulse, higher single pulse energy of ultraviolet and few-cycle femtosecond intense laser pulses. It more useful in the experimental study of warm dense matter, high-order harmonic generation, isolated attosecond pulse generation and the ultra-fast pump-probe technology.

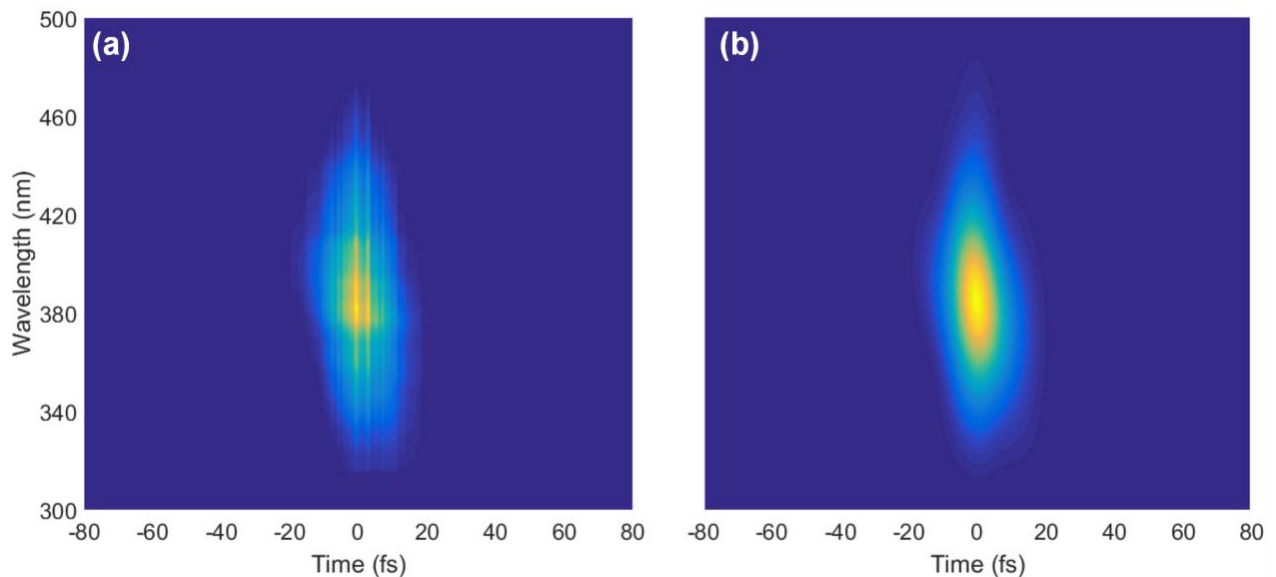


Fig. 1. (a) FROG trace measured in the experiment. (b) FROG trace retrieved by the algorithm.

Key Words: pulse compression; ultrafast non-linear optics; driving laser of attosecond pulse; few-cycle pulses; SD-FROG;

References:

- [1]** R. Kienberger, E. Goulielmakis, M. Uiberacker, A. Baltuska, V. Yakovlev, F. Bammer, A. Scrinzi, T. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, and U. Heinzmann. Atomic transient recorder. *Nature*, 427(6977):817–21, 2004.
- [2]** T. Gaumnitz, A. Jain, Y. Pertot, M. Huppert, I. Jordan, F. Ardana-Lamas, and H. J. Wörner. Streaking of 43-attosecond soft-x-ray pulses generated by a passively cep-stable mid-infrared driver. *Optics Express*, 25(22):27506–27518, 2017.
- [3]** Jie Li, Xiaoming Ren, Yanchun Yin, Kun Zhao, Andrew Chew, Yan Cheng, Eric Cunningham, Yang Wang, Shuyuan Hu, and Yi Wu. 53-attosecond x-ray pulses reach the carbon k-edge. *Nature Communications*, 8(1):794, 2017.

- 【4】 A. H. Zewail, Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond, *J. Phys. Chem. A* 104(24), 5660–5694 (2000).
- 【5】 T. Kobayashi, T. Saito, and H. Ohtani, Real-time spectroscopy of transition states in bacteriorhodopsin during retinal isomerization, *Nature* 414(6863), 531–534 (2001).
- 【6】 D. Polli, M. R. Antognazza, D. Brida, G. Lanzani, G. Cerullo, and S. De Silvestri, Broadband pump-probe spectroscopy with sub-10-fs resolution for probing ultrafast internal conversion and coherent phonons in carotenoids, *Chem. Phys.* 350(1-3), 45–55 (2008).

Q-P008

专题代号：Q

在固体中产生高次谐波的实验探究

涂艳云、张栋文、王小伟、赵增秀

国防科技大学文理学院，长沙 410073

Email: tuyanyun14@nudt.edu.cn

摘要：高次谐波是强激光场和物质相互作用发生的一种非线性效应。早在五十多年前，Keldysh 提出了一个重要的想法，将电子和固体放在同一个立足点上看待，他陈述了在强激光场作用下，固体从价带到导带的跃迁可以和隧穿相类比。近几十年来，研究者们对于高次谐波的研究主要集中在气体中，直到 2010 年，Ghimire 等人用脉冲能量分别为 $0.52 \mu\text{J}$ 和 $2.63 \mu\text{J}$ 的中红外激光与厚度为 $500 \mu\text{m}$ 的 ZnO 相互作用产生了最高阶数分别为 17 阶和 25 阶的高次谐波，这个突破性的实验刺激了更深层的研究，至此强激光与固体相互作用的研究引起了人们的广泛关注。当前高次谐波已经可以在不同的材料中产生，从宽带隙的绝缘体（诸如 MgO 晶体，SiO₂ 晶体等）到新型材料（石墨烯，单层 MoS₂ 等），这些实验的研究目的集中在探究固体高次谐波的产生机制、产生高截止能量的谐波谱从而合成高能的单个阿秒脉冲以及利用高次谐波产生中的超快电子动力学成像固体结构信息。在实验室条件下，我们用中红外激光激发 MgO 晶体产生高次谐波，观察到五阶七阶九阶的谐波谱，并研究了谐波谱强度随激光偏振和晶轴夹角的依赖关系。

关键词：高次谐波产生、MgO 晶体

参考文献

- 【1】 Keldysh L V. Ionization in the field of a strong electromagnetic wave [J]. *Soviet Physics JETP*. 1965, 20: 1307–1314.
- 【2】 Ghimire S, Dichiara A D, Sistrunk E, et al. Observation of high-order harmonic generation in a bulk crystal[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(2):138-141.

Q-P009

专题代号: Q

N₂ 分子在双色场下产生纯偶次谐波

杨艳、刘璐、赵晶、刘金磊、赵增秀

国防科技大学文理学院物理系, 长沙 410073

Email: zhaozengxiu@nudt.edu.cn

摘要: 最近关于单色场下取向的 CO 分子产生纯偶次谐波的研究揭示了固有偶极矩对分子高次谐波的影响。为了进一步理解固有偶极矩对高次谐波的作用, 我们进行了如下的研究。本文采用含时 Hartree-Fock 理论研究了 N₂ 分子在双色场下所产生的高次谐波。如果仅在垂直于分子轴方向 (Y 方向) 添加一束 800 nm 的长脉冲激光, 在分子轴方向上是无法获得到任何谐波信号的; 但在此基础上, 若再在分子轴方向 (Z 方向) 上添加一个静电场 (或 THz), 我们则可以从分子轴方向得到纯偶次的高次谐波。这一结果在一定程度上证明了固有偶极矩确实导致了纯偶次谐波的产生。由此看来, 我们有必要深入研究固有偶极矩对高次谐波的贡献, 以期在此基础上获得更短的阿秒脉冲。

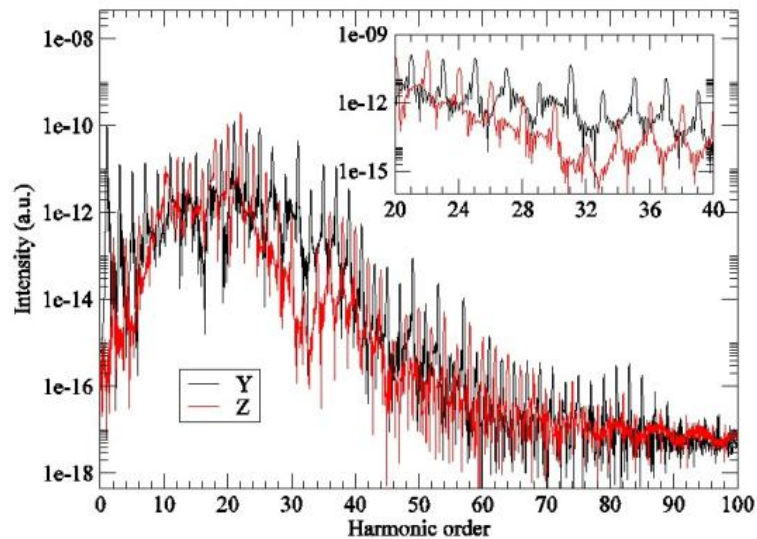


Fig. 1. High harmonic spectra of oriented CO in y-axis direction(black line) and z-axis direction(red line).

关键词: N₂ 分子, 偶次谐波, 含时 Hartree-fock 方法

参考文献

- 【1】 Hu H, Li N, Liu P, et al. Pure Even Harmonic Generation from Oriented CO in Linearly Polarized Laser Fields[J]. Physical Review Letters, 2017, 119(17):173201.
- 【2】 Zhang B, Yuan J, Zhao Z. DMTDHF: A full dimensional time-dependent HartreeCFock program for diatomic molecules in strong laser fields [J]. Computer Physics Communications, 2015, 194:84-96.

Q-P010

专题代号: Q

Ne 气产生高次谐波和超连续谱的实验研究

王力, 肖凡, 王小伟, 赵增秀

国防科技大学文理学院, 长沙

Xiaowei.wang@nudt.edu.cn

摘要: 超强飞秒激光与气体靶之间的极端非线性相互作用产生的高次谐波, 由于其具有很宽的频谱范围和固有的良好相干性, 是产生新一代超短阿秒光源和极紫外相干光源的很有前途的途径之一。因此, 近几十年来得到了很广泛的研究。实验上用红外少周期飞秒激光与气体相互作用, 能够产生 KeV 光子能量的高次谐波, 覆盖了 C 原子 K 壳层吸收边。单个阿秒的实验进展也已经达到了 43 as 的脉冲宽度。最近, 实验上用周期级中红外激光与气体相互作用, 产生了宽带超连续谱, 并研究了气压对连续谱产生的调控作用, 发现适当的气压可作为产生超连续谱的选通门。我们使用 FEMTOPOWER COMPACT PRO Laser 激光系统产生的功率 4.2 mJ, 持续时间 25 fs, 中心波长 800 nm, 重频 1KHz 的飞秒激光, 研究了 Ne 气在长脉冲和短脉冲情况下分别产生的分离谐波谱和超连续谐波谱。首先, 我们研究了长脉冲与 Ne 气作用产生的高次谐波。图 1 所示, (a)为 25 fs, 3.7 mJ, 中心波长 800 nm 的激光与 63 mbar 的 Ne 气体池相互作用产生的分离谐波经过光栅聚焦在 MCP 上测得的高次谐波谱。(b)为对应于(a)的光谱图。在(b)图中, 可以清楚地看到铝膜的截止边(45 阶)。其次, 我们研究了少周期脉冲与 Ne 相互作用, 并产生了宽带超连续谱。图 2 所示是 5.4 fs, 2.0 mJ, 中心波长 800 nm 的激光与 95 mbar 的 Ne 气相互作用, 基于 DOG 选通门技术产生的超连续谱。在此过程中, 我们先后通过优化 DOG 系统参数、气体压强和激光-气体相互作用的位置使得得到最优的连续光谱。高次谐波超连续谱在时域上对应于单个的阿秒脉冲, 因此, 我们可以进一步对原子、分子中的超快过程进行阿秒脉冲的泵浦-探测实验, 以及通过瞬态吸收实验探测物质的结构等信息。

关键词: 高次谐波, 阿秒脉冲, 超连续谱。

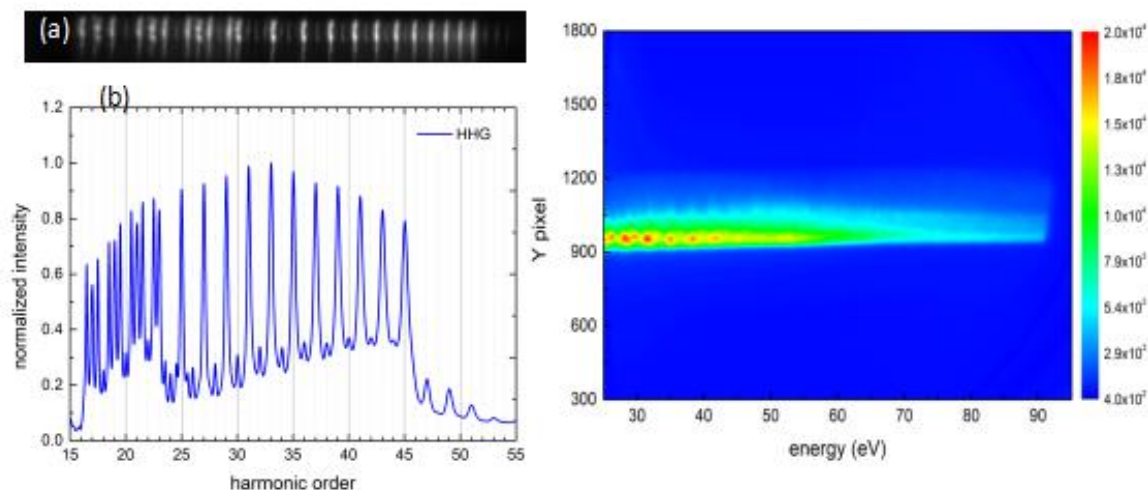


图 1. 25 fs, 3.7 mJ, 中心波长 800 nm 的激光与 63 mbar 的 Ne 气体池相互作用产生的谐波谱。(a)为 X-ray CCD 得到的图。图 2. 5.4 fs, 2.0 mJ, 中心波长 800 nm 的激光与 95 mbar 的 Ne 气相互作用, 基于 DOG 选通门技术产生的超连续谱。

Q-P011

专题代号: Q

$(\text{NH}_3)_n$ 团簇在强激光场下的质子转移效应

尹钟钰、余西涛、于嘉琪、罗嗣佐*、丁大军*

吉林大学原子与分子物理研究所, 长春 130012

分子间的质子转移广泛存在于多种物理和化学反应中, 研究分子间的质子转移有助于人们更好的理解含氢分子在强激光场下的超快过程[1]。本文利用中心波长为 800nm, 脉宽为 35fs 的圆偏振激光, 结合冷靶反冲离子动量成像谱仪(COLTRIMS)研究了 $(\text{NH}_3)_n$ 团簇在飞秒强激光作用下的分子间质子转移现象。实验通过离子多体符合测量确认了分子间的质子转移现象, 结合能量关联图(图 1、2)发现 $(\text{NH}_3)_3$ 在激光脉冲的前沿被部分电离, 其中的一个 NH_3^+ 由于库仑排斥作用发生解离, 由于质子转移的时间尺度非常短, 剩余的 $\text{NH}_3^+-\text{NH}_3$ 会在激光脉冲作用的过程中被电离并发生质子转移。我们在 $(\text{NH}_3)_4$ 团簇中也观察到了类似的现象, 两个 NH_3^+ 会在库仑爆炸前先发生解离。此外, 我们还观察到了 $(\text{NH}_3)_4$ 发生质子转移的两种不同路径: 相邻分子间转移和相对分子间转移, 随着质子转移数的增加, 相对分子间的质子转移过程也变得越来越困难。进一步本文观察到了 $(\text{NH}_3)_n$ 团簇在强激光场作用下质子转移过程中的团簇结构变化, 该研究对理解含氢分子间的质子转移效应具有重要的意义。

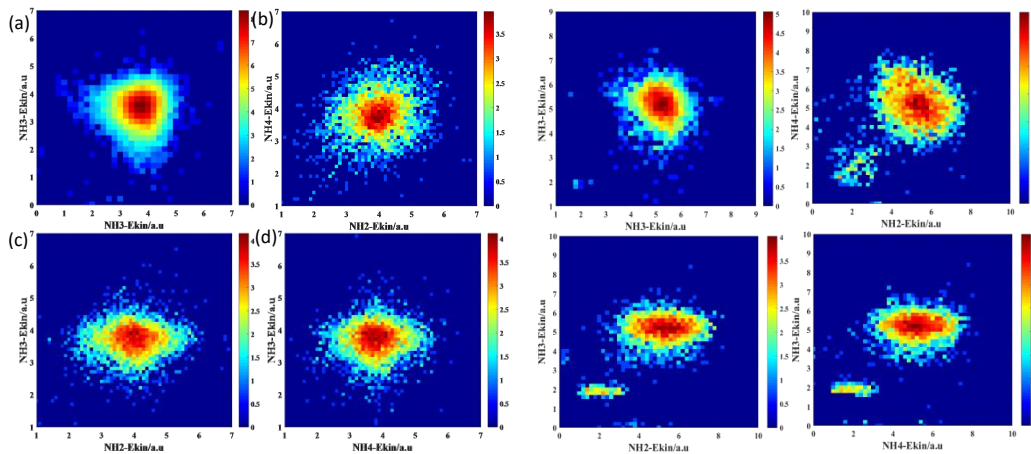


图 1 $\text{NH}_2\text{-NH}_4\text{-NH}_3$ 分子间的能量关联图. 图 2 $\text{NH}_2\text{-NH}_4\text{-NH}_3\text{-NH}_3$ 分子间的能量关联图.

关键词：质子转移、库仑爆炸、团簇

参考文献

- [1] Bing Yuan, Joong-Won Shin, and Elliot R. Bernstein, Dynamics and fragmentation of van der Waals and hydrogen bonded cluster cations, *J. Chem. Phys.* 2016, 144, 144315.
 [2] P. Farmanara, V. Stert, H.-H. Ritze, W. Radloff, and I. V. Hertel, Control of the fragmentation of excited ammonia clusters by femtosecond infrared laser pulses, *J. Chem. Phys.* 2001, 115, 277.

*国家自然科学基金（11534004, 11704148, 11627807）项目资助

Q-P012

专题代号：Q

不同电子受体的全无机钙钛矿电池材料的光生载流子输运机理的超快光谱研究

席文迪, 安洁, 都鲁超*

吉林大学 原子与分子物理研究所, 长春 130012

lcd@jlu.edu.cn

摘要

全无机钙钛矿材料由于其低成本, 制造简单及热稳定性好而成为钙钛矿太阳能电池研究领域的热点之一。太阳能电池光电转换效率的提高, 在揭示其微观机理的基础上才能明确攻克的方向。超快光谱是研究光电转换材料及器件中载流子产生、复合和迁移等过程的非常灵敏的实验手段。目前关于全无机钙钛矿电池材料的超快动力学研究非常少, 特别是对于界面间载流子分离传输的研究更少, 这方面的物理机制还远远没有研究清楚。理解钙钛矿太阳能电池界面电荷转移的微观物理机制对新型太阳能电池器件的设计有着深远的意义。我们的工作就是通过将全无机钙钛矿纳米材料 (CsPbBr_3) 与半导体进行组装, 调控改变半导体的种类, 采用的半导体包括 TiO_2 , SnO_2 , ZnO , 研究光激发条件下界面光生载流子的分离,

扩散及复合过程。我们通过全局拟合所得的不同的半导体组装全无机钙钛矿体系的超快光谱数据,拟合所得四个组分,分别是热载流子冷却,自由激子形成,界面电荷转移和电荷复合。我们发现,热载流子冷却过程与半导体的种类无关,其时间常数大约在 600ps 左右。界面电荷转移时间常数与半导体的能级位置及态密度两个因素有关。而电荷复合过程与半导体的电子扩散常数及尺寸相关。

关键词:飞秒瞬态吸收光谱 全无机钙钛矿 电池材料 电荷转移 电荷复合

1. Xing, G.; Mathews, N.; Sun, S.; Lim, S. S.; Lam, Y. M.; Graetzel, M.; Mhaisalkar, S.; Sum, T. C. Long-Range Balanced Electron- and Hole-Transport Lengths in Organic-Inorganic $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. *Science* 2013, 342, 344-347.
2. Zhang, P., et al.. "Ultrafast Interfacial Charge Transfer of Cesium Lead Halide Perovskite Films CsPbX_3 ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) with Different Halogen Mixing." *The Journal of Physical Chemistry C* 122(48): 27148-27155.(2018)

Q-P013

专题代号: Q

基于光子能量和光子密度调制的非简并双光子吸收动力学探测

赵圆圆、段宣明

暨南大学光子技术研究院, 广州 511443

Email: xmduan@jnu.edu.cn

摘要: 非线性光学材料,在强光子密度照射的情况下,可以发生两种或多种以上非线性机制,如多光子吸收(MPA)^[1],多光子诱导的自由载流子吸收(FCA)^[2]和四波混频(FWM)。材料的光学非线性效应已经应用于许多领域,如飞秒激光三维微加工,双光子荧光成像,全光开关,光限幅,光存储和频率上转换激光。在半导体领域,研究人员已从实验和理论角度对半导体材料的非线性特性和应用进行了广泛的研究。已知半导体带隙能量 E_g 随温度变化,温度越低,带隙越大,因此,MPA 系数 α_n 会相应变化^[3]。然而,MPA 系数还受光子密度(I)和光子能量($\hbar \omega$),激发激光束的偏振态,晶体取向等的影响。MPA 的非线性阶数 $n(n \geq 2)$ 也取决于激发光的光子密度(I)和光子能量($\hbar \omega$)。对于双色激发飞秒激光,非简并双光子吸收(ND-2PA)系数大于简并双光子吸收(D-2PA)系数。特别是极端 ND-2PA(两个激发光之间的 $\hbar \omega$ 差异较大)系数大到相当于 D-2PA 系数的数千倍^[4]。

ZnS 是一种典型的直接带隙($E_g = 3.68 \text{ eV}$)半导体,主要用于蓝紫外光发射器和探测器等。基于这些潜在的应用人们对 ZnS 的基本物理性质进行了广泛的研究。除此之外,还有关于 ZnS 非线性光学特性的报道,包括多光子吸收(MPA)^[5],克尔非线性折射和 MPA 诱导自由载流子吸收(FCA)等。因此,迫切需要阐明不同光学非线性吸收发生的条件,以及区分不同的非线性过程,有利于充分利用 ZnS 材料优异的光电性能。对于材料的光学非线性过程的精确区分和测量,通常因为两个或更多非线性机制的并存

或竞争而变得复杂^[6]。在许多情况下，目前的实验技术无法准确区分这些不同的非线性过程。例如，在 ZnS 中经常可观察到 ND-2PA 和 2PA 的同时存在，自由载流子吸收以及其累积的自由电子衰减时间长于脉冲宽度。

我们主要利用时间分辨双色飞秒泵浦探测系统结合 Z 扫描技术，来研究在光子密度(I)和光子能量 ($\hbar \omega$)调制下，ZnS 多晶硅片中非线性动力学条件依赖关系。以揭示 ZnS 中发生的各种非线性过程，并分辨其各自的贡献。如图 1(a)所示，ZnS 晶体中存在由非线性吸收引起的各种可能的电子跃迁过程，在精心设计的实验配置下如图 1(b)，研究非简并双光子吸收和自由载流子吸收，其中离散的探测光波长范围从 480nm(2.59eV)到 630nm(1.97eV)，泵浦光波长恒定为 800nm(1.55eV)。在弱泵浦光和弱探测光的光子密度条件下，ZnS 中只有非简并双光子吸收 (ND-2PA)，且探测光具有完美的 U 形透射率曲线(对于图 1(d)黄色背景数据)。在强泵浦光和弱探测光的光子密度条件下，发生包括 ND-2PA，3PA 和 FCA 的复合非线性吸收机制，导致探测光具有不对称 U 形透射率曲线，(对应于图 1(d)绿色背景数据)。我们修正并开发了一个理论模型来拟合实验数据，实验中测量的 ZnS 光学非线性动力学与包括(ND-, D-)2PA，3PA，多光子诱导的 FCA 和各种重组机制的模型一致，进一步我们提取获得了 ZnS 中的光子密度和光子能量依赖性 2PA，3PA 和 FCA 系数。最后，利用提取的多光子吸收系数，讨论了在不同条件下的非线性吸收过程，并评估了其作为全光学器件材料的适用性。

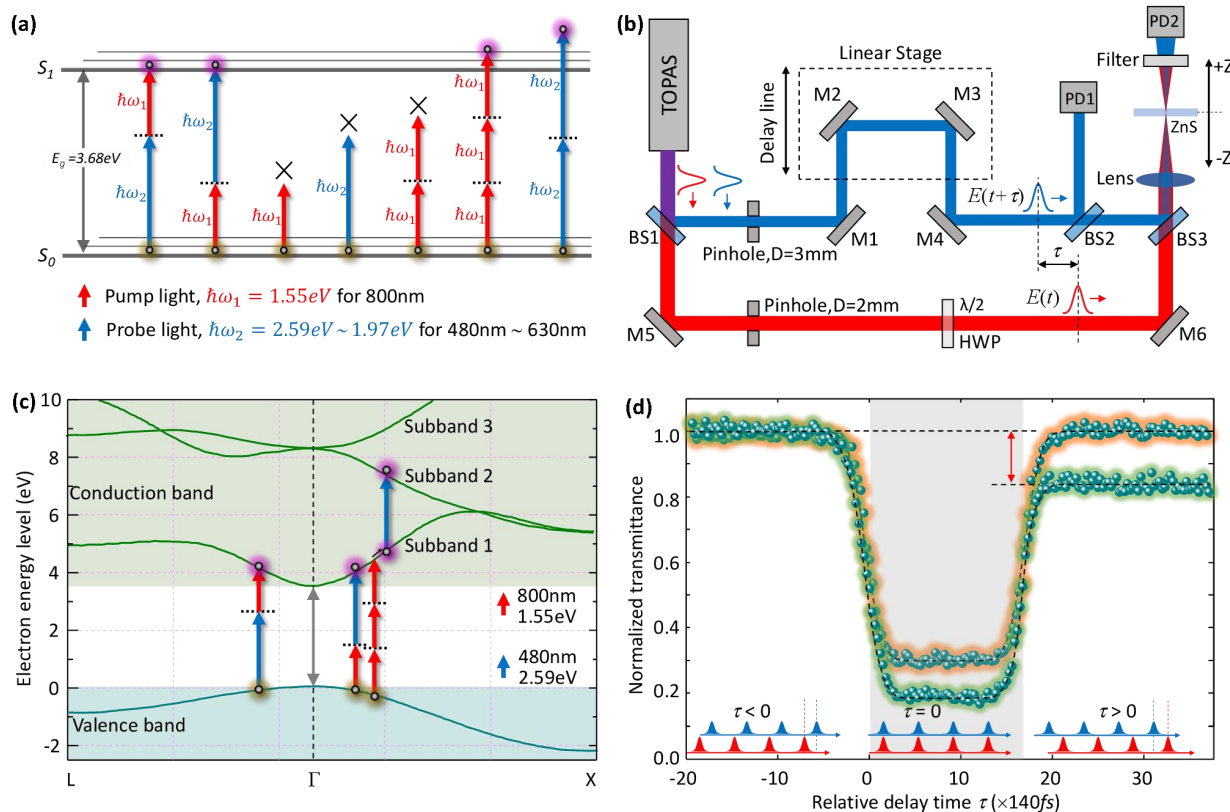


图 1 (a) ZnS 晶体中电子跃迁示意图；(b)时间分辨双色飞秒泵浦探测系统；(c) ZnS 晶体中非简并双光子吸收和其诱导的自由电子跃迁；(d) 探测光透射率曲线。

关键词：非简并双光子吸收，泵浦探测，非线性吸收

参考文献

- 【1】 C. M. Cirloganu *et al.*, Three-photon absorption spectra of zinc blende semiconductors: theory and experiment, *Opt. Lett.* 2008, 22, 2626-2628.
- 【2】 B. Gu *et al.*, Two-photon-induced excited-state absorption: Theory and experiment, *Appl. Phys. Lett.* 2008, 92, 091118.
- 【3】 P. D. Olszak *et al.*, Spectral and temperature dependence of two-photon and free-carrier absorption in InSb, *Phys. Rev. B* 2010, 82(23), 235207.
- 【4】 C. M. Cirloganu *et al.*, Extremely nondegenerate two-photon absorption in direct-gap semiconductors, *Opt. Express* 2011, 19(23), 22951-22960.
- 【5】 R. A. Negres *et al.*, Experiment and Analysis of Two-Photon Absorption Spectroscopy Using a White-Light Continuum Probe, *IEEE J. Quantum Electron.* 2002, 38(9), 1205-1216.
- 【6】 M. Shui *et al.*, Measurements of dynamics of nondegenerate optical nonlinearity in ZnS with pulses from optical parameter generation, *Opt. Commun.* 2011, 285(2012), 1940-1944.

基金项目：国家重点研发计划纳米科技重点专项(批准号：2016YFA0200501 和 2016YFA0200502)

Q-P014

专题代号：Q

氙原子非共振多光子电离

戴晨、张林林、缪志明、郑伟、吴成印

北京大学物理学院，北京 100871

Email: cywu@pku.edu.cn

摘要：飞秒激光和原子分子相互作用过程非常复杂，通过对电离产生的电子和离子进行探测，可以揭示激光与原子分子相互作用的物理本质。最近我们在北京大学新建立一台双探测器速度成像谱仪，可以同时探测电子和离子。在这台谱仪上，我们实验研究了波长为 266 纳米、400 纳米和 800 纳米的飞秒激光作用下氙原子的多光子电离。通过测量光电子能谱和角分布，我们发现在我们的实验条件下，非共振多光子电离起主导。它遵循偶极选择规则，相邻的阈上电离谱峰的角动量改变一个量子数。

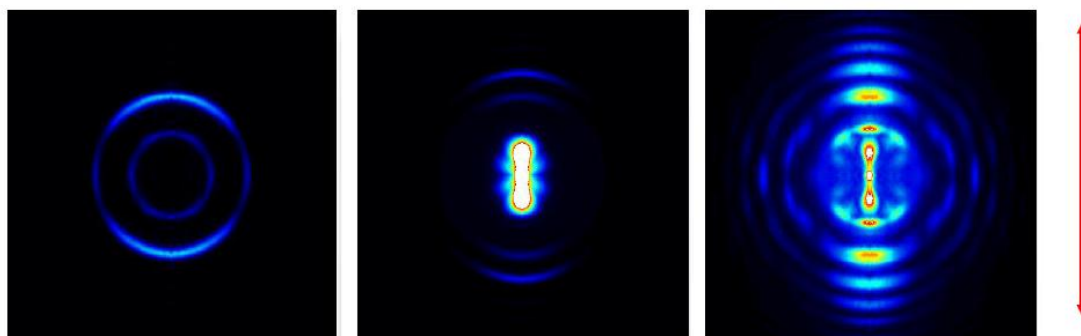


图 1: 波长 266 纳米 (左图)、400 纳米 (中间) 和 800 纳米 (右图) 飞秒激光脉冲作用下, 氙原子多光子电离光电子角分布。箭头代表激光偏振方向。

关键词: 速度成像谱仪, 飞秒激光, 多光子电离

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.11625414)

Q-P015

专题代号: Q

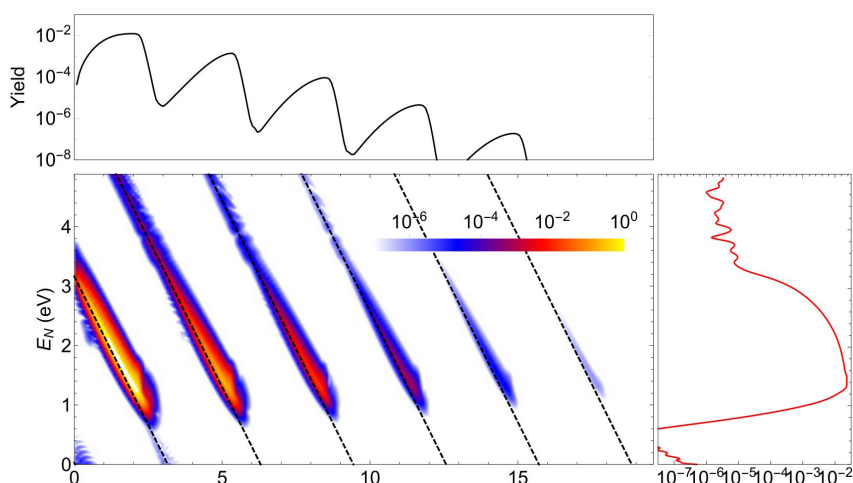
基于强场近似的电子-核能量共享研究

梁昊、彭良友

北京大学现代光学研究所, 北京 100871

Email: haoliang@pku.edu.cn

摘要: 在强激光场中分子的动力学远较原子复杂。一个典型的例子是, 分子可以通过电离解离变成碎片, 此时电子与核的动力学将高度关联。而完整求解氢分子的全维含时薛定谔方程是极端困难的 [2]。我们提出了一个强场近似与非齐次含时薛定谔方程的混合理论模型, 在保留电子-核之间的相干性的同时依然只需要求解氢分子离子解离的动力学, 最终能得到与实验 [1] 相一致的联合能量谱。同时我们也可以计算非解离过程中光子能量在电离电子和氢分子离子振动态之间的共享, 有待实验的进一步验证。



此外, 基于这套理论框架, 我们可以在电子-核关联的视角下讨论以前的各种解离动力学 [3], 如动态解离淬灭、键软化、振动布居囚禁和朗道齐纳隧穿等。我们发现在紫外和红外脉冲光激发下, 能量共享的具体行为将非常不同。通过在强场近似的戴森级数中再补回一项, 可以期望我们也可以讨论电离电

子再散射导致的动力学，如受挫解离、非电离库伦爆炸等；这套框架也很容易应用于其他体系，如氦原子的双电离过程。

关键词：氢分子，解离，电离

参考文献

- 【1】 Wu, J. *et al.* Electron-Nuclear Energy Sharing in Above-Threshold Multiphoton Dissociative Ionization of H₂, *Phys. Rev. Lett.* 2013, 111 (2), 023002.
- 【2】 Palacios, A., Sanz-Vicario, J. L. and Martín, F. J. Theoretical methods for attosecond electron and nuclear dynamics: applications to the H₂ molecule, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2015, 48 (24), 242001.
- 【3】 Ibrahim, H., Lefebvre C., Bandrauk A. D., Staudte A. and Légaré F. H₂: the benchmark molecule for ultrafast science and technologies, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2018, 51 (4), 042002.

基金项目：国家自然科学基金项目 (NO. 11725416, NO. 11574010)

Q-P016

专题代号：Q

Ultrafast excitation dynamics for noble gas atoms subject to intense femtosecond laser fields

SongPo Xu^{1,2}, MingQing Liu^{3,4}, ShiLin Hu⁵, Zheng Shu^{3,4}, Wei Quan^{1,*}, Jing Chen^{3,4,*}, and XiaoJun Liu^{1,*}

¹*State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*

²*School of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

³*HEDPS, Center for Applied Physics and Technology, Peking University, Beijing 100084, China*

⁴*Institute of Applied Physics and computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China*

⁵*Laboratory of Quantum Engineer and Quantum Metrology, School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China*

Email: xjliu@wipm.ac.cn

The ionization dynamics for atoms subject to an intense laser field can be comprehended with the physical picture between two limiting cases, i.e., multiphoton ionization and tunneling ionization. A pivotal role is given to the Keldysh parameter γ to indicate the transition between these two limits, which has already been elucidated by plenty of documented works (see, e.g.,[1-3]). In contrast to the atomic ionization dynamics in strong laser field, atomic excitation dynamics has not yet been well understood. The consensus on the mechanism of atomic excitation in an intense laser field hasn't been reached so far. More importantly, the formation of a complete picture of this strong field phenomenon is still hindered by the limited experimental

works and, meanwhile, the rather coarse measurement precision so far.

In this Letter, we report a comprehensive investigation of the atomic excitation dynamics and successfully observe a transition from MPI to TI regime. We show a clear transition of strong field atomic excitation from the regime of multiphoton to tunneling ionization by investigating the intensity dependence of the yields of neutral excited atoms (Ar^*) and singly charged ions (Ar^+) of argon. Our results indicate that, for 400 nm, the multiphoton resonance mechanism plays a significant role at low intensity and coherent recapture mechanism becomes important at high intensity. While for 800 nm, distinctive out-of-phase oscillations of Ar^* and Ar^+ yields are identified in experiment for the first time, implying that coherent recapture mechanism dominates. Our work provides a more comprehensive understanding of the atomic excitation mechanism in an intense laser field [4].

Key Words: Atomic excitation, strong laser-field, multiphoton resonance mechanism, coherent recapture mechanism.

Acknowledgement: This work is supported by the National Key Research and Development program (No. 2016YFA0401100), the National Natural Science Foundation of China (No. 11834015, No. 11847243, No. 11804374, No. 11874392, No. 11774387, No. 11527807, and No. 11425414), the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2017M622557), and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDB21010400).

References:

- [1] B. Walker et al., Phys. Rev. A 48, R894 (1993)
- [2] E. Mevel et al., Phys. Rev. Lett. 70, 406 (1993).
- [3] J. L. Chaloupka et al., Phys. Rev. Lett. 90, 033002 (2003).
- [4] S. P. Xu et al., (submitted)

Q-P017

专题代号：Q

超快激光辅助制备仿芦苇叶各向异性超疏水石墨烯

毛江维，张永来*

吉林大学电子科学与工程学院，吉林 长春 130012

石墨烯及其衍生物表面浸润性的调控，使得石墨烯在微流控芯片、仿生电子等领域有重要应用。然而，具有各向异性的超疏水石墨烯薄膜难以制备，限制其在上述领域的应用。受到芦苇叶启发，我们利用光刻技术和激光全息技术相结合的方法处理氧化石墨烯薄膜，制备具有各向异性超疏水特性的微结构。首先，利用光刻技术制备周期为 200 μm 的 SU-8 微槽结构衬底（类似芦苇叶的叶脉），使得衬底本身具有各向异性的特点。然后，在微槽结构表面涂覆氧化石墨烯，利用纳秒激光双光束干涉技术处理氧化石墨烯。纳秒激光干涉处理氧化石墨烯既可以实现氧化石墨烯化学组成的调控，又可以实现微纳结构的制备。由于氧化石墨烯表面含氧官能团不稳定，受到激光辐照会以气体形式脱除，形成微孔结构。调节纳秒激光器的输出能量，可以调节氧化石墨烯的还原程度和氧含量。此外，利用双光束干涉技术，还可以制备微纳条纹的还原氧化石墨烯。这种综合效应赋予石墨烯薄膜类似于芦苇叶的各向异性超疏水性。各向异性超疏水性与石墨烯表面的结合无疑会促进多个领域的发展，例如：具有防水特点的仿生电子和用于组织工程的生物相容性衬底等。

关键词 石墨烯； 紫外光刻； 双光束干涉； 超疏水

Q-P018

专题代号：Q

偏振调控的强激光场驱动产生 N_2^+ 空气激光研究

谢红强^{1,2}、张骞¹、李贵花¹、王小伟¹、王力¹、雷洪斌¹、赵增秀¹

¹ 国防科技大学文理学院，长沙 410073

² 东华理工大学理学院，南昌 330013

Email: xhq3126336@sina.com

摘要：近年来，强场激光驱动产生的空气激光在实现远程大气遥感等应用方面存在较大潜力。此外，空气激光光谱也已被证明是研究强场原子分子物理的一种有效手段。特别地，基于强场电离诱导产生的氮气离子激光被发现其物理机制非常复杂，其最根本的物理机制目前还存在诸多争议。一方面，实验中发现多种分子量子相干性包括分子电子态之间的相干、分子振动相干、分子转动相干对氮分子离子激光的产生会有巨大的影响；另一方面，关于其物理机制目前主要存在两种争议，一种是基于粒子数反转产生的种子放大；另一种是基于分子之间量子相干性而产生的分子超辐射机制。此外，基于 V-型三能级量子相干驱动产生的无反转激光也被提出来解释氮分子离子激光现象。所以当前一个主要的争议就是氮分子离子激光的产生是否需要粒子数反转。最近，国内科研小组发现，运用偏振门技术可以大大提高氮分子离子激光的产生，这一重大发现为我们优化氮气离子激光产生过程中的超快电离与粒子数耦合过程提供了全新的思路。基于此，我们提出了另一种调控泵浦光偏振的方法，并且发现这种方法可以产生比偏振门技术更强的激射信号。此外，通过观察从吸收到激射的连续变化，我们发现在我们实验条件下，粒子数反转对于氮气离子空气激光的产生是必备条件。

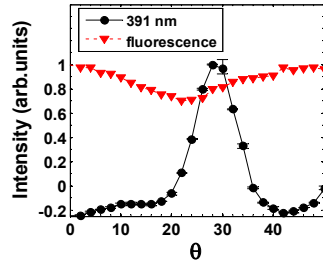


图 1 氮气离子激光强度随泵浦光偏振的变化

关键词： 强场超快激光、氮气离子激光、粒子数反转、偏振门

[1] Hongqiang Xie *et al*, Vibrational population transfer between electronic states of N_2^+ in polarization-modulated intense laser fields, PRA, submitted.

[2] Helong Li *et al*, Significant Enhancement of N_2^+ Lasing by Polarization-Modulated Ultrashort Laser Pulses, Phys. Rev. Lett. 2019, 122, 013202.

基金项目： 国家自然科学基金项目（NO. 91850201、61705034、61605227）等

Q-P019

专题代号： Q

Asymmetric blue peak of supercontinuum from filamentation in the anomalous dispersion regime

Ya Tian^{1,2}, Cheng Gong^{1*}, Zixi Li¹, Xiaojun Liu^{1#}, Xiangming Hu²

¹State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China

²College of Physics and Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

*Email : gongcheng@wipm.ac.cn

Email : xjliu@wipm.ac.cn

Femtosecond filamentation has been a hot topic in strong field laser physics in the last two decades [1]. Generation of a supercontinuum (SC) ranging from UV to near IR accompanied with filamentation in transparent solids represents a compact and versatile source of coherent radiation, which offers potential applications in various research fields [2]. In recent years, many efforts have been being directed to study filamentation with ultrashort mid-infrared (MIR) laser pulses, which give an access to the range of anomalous group velocity dispersion (GVD) [3]. In this regime, the interplay between self-action effects and anomalous GVD facilitates generation of ultra-broadband supercontinuum, self-compression of the laser pulse down to few-optical-cycle duration and eventually, formation of spatiotemporal light bullets. These phenomena can be understood by the effective three-wave mixing (ETWM) model [4], which relates the spectral information to the laser pulse propagation dynamics in the media [5]. Especially, when femtosecond MIR pulses filament in

fused silica, a blue-shifted continuum peak in the visible regime was generated [6], which can be quantitatively reproduced by the ETWM model. However, to the best of our knowledge, there is yet little research about the structure of the peaks in detail.

In our work, we experimentally investigate the structure of the blue-shifted SC peak when mid-infrared wavelength laser pulses filament in a fused silica. An asymmetric blue-shifted peak in the supercontinuum is generated in the visible regime. After numerically simulating the femtosecond laser pulse propagation in the sample, it is found that the blue-shifted SC peak can only be formed after intensity clamping, and its asymmetric spectral structures can be related to the temporal pulse propagation dynamics in fused silica by the ETWM model. Our work indicate that the formation of blue peak accompanied by filamentation presents a new method of transferring pulses energy to specific wavelengths in the visible region, and the spectral structure of the supercontinuum can provide us a new insight in the femtosecond laser propagation dynamics in condensed media.

References

- 【1】 A. Couairon and A. Mysyrowicz , *Phys. Rep.* , 441 , 47 (2007).
- 【2】 Audrius Dubietis *et.al*, *Lith. J .Phys.* 57, 113(2017)
- 【3】 A. Couairon *et.al*, *Laser Filamentation* (2016).
- 【4】 M.Kolesik, E.M.Wright, J.V.Moloney, *Opt. Express* 13, 10729 (2005).
- 【5】 Cheng Gong *et.al*, *Opt. Lett.* 41, 4305 (2016).
- 【6】 M. Durand *et.al*, *Phys. Rev. A* 87, 043820 (2013).

基金项目：国家自然科学基金项目（NO. 11527807）等

Q-P020

专题代号： Q

氙原子受挫非次序双电离的光强依赖

陈实^{1,2}、康会鹏³、陈京^{2,4}

¹北京大学物理学院，北京 100871

²北京大学应用物理与技术研究中心，北京 100871

³中国科学院武汉物理与数学研究所，武汉 430071

⁴北京应用物理与计算数学研究所，北京 100088

Email: chenshi@pku.edu.cn

摘要：过去的十余年里，受挫的隧穿电离(Frustrated Tunneling Ionization, FTI)以及分子受挫双电离(Frustrated Double Ionization, FDI)吸引了大量的实验与理论研究。对于 FDI，已有的半经典计算大都基于次序电离图像。最近有实验^[1]表明，在氙原子体系中，受挫双电离呈现了由非次序区向次序区的转变。我们使用半经典方法在非次序光强区间内对氙原子 FDI 进行了模拟，计算得到了与实验一致的逃逸电子动量分布。进一步的计算发现，氙原子 FDI 与单电离(Single Ionization, SI)的比值随光强增加呈现出与双电离(Double Ionization, DI)类似的膝盖形结构，FDI 与 DI 的比值随光强增加而下降。在低光强区，

两个电子被俘获的几率接近，逃逸电子动量分布呈单峰结构，碰撞后形成的双激发态(Doubly Excited State, DES)起到了重要作用；在相对高光强区，初始被束缚的电子比初始隧穿电子更容易被俘获到高激发态，逃逸电子动量分布呈双峰结构，碰撞后形成的单激发态起到了重要作用。

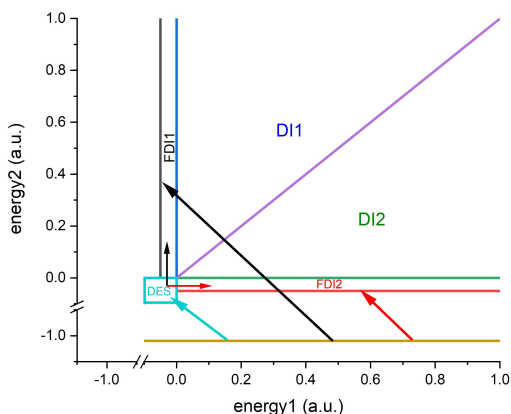


图 1 受挫双电离，双电离，双激发态能量区间示意图

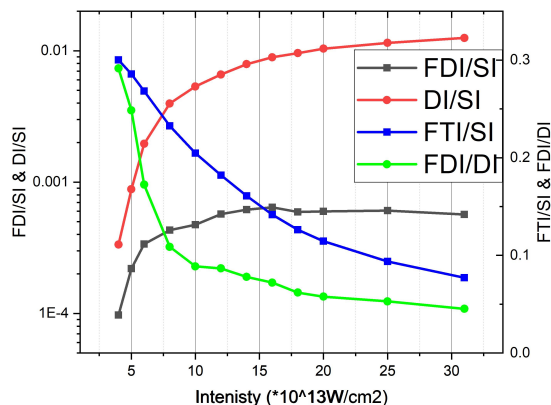


图 2 FTI, FDI, DI 与 SI 比值以及 FDI/DI 随光强变化曲线

关键词：受挫双电离 半经典方法

参考文献

- 【1】 Seyedreza Larimian *et al.*, Frustrated Double Ionization of Argon Atoms in Strong Laser Fields. *ArXiv:1801.03738v1*.

Q-P021

专题代号：Q

阿秒脉冲光源与冷靶反冲离子动量成像谱仪的结合

宋盼¹、王小伟¹、孟从森¹、吕治辉¹、张栋文¹、赵增秀^{1*}、袁建民^{1,2†}

1 国防科技大学物理系，湖南长沙 410073

2 中国工程物理研究院研究生院，北京 100193

*Email: zhaozengxiu@nudt.edu.cn

†Email: jmyuan@nudt.edu.cn

摘要：冷靶反冲离子动量成像谱仪（COLTRIMS）是原子分子物理研究领域中有力的研究工具，在原子分子碰撞反应动力学研究中得到了广泛的应用^[1]。而飞秒激光技术的出现为人们分辨上研究超快动力学提供了可能。利用飞秒泵浦—探测技术，人们成功地控制了化学键的成键与断裂，并前所未有地观察到了化学反应中间过程^[2]。但是，微观体系中原子状态的演化则是由阿秒尺度上的电子运动决定的，而若要在时间上分辨原子分子内部电子的动力学过程，就需要比飞秒更短的激光脉冲—

阿秒脉冲。我们采用高次谐波产生技术^[3]获得阿秒脉冲串（APT）和单个阿秒脉冲，由于高次谐波本质上是一系列时间上周期排列的阿秒脉冲串，这种技术不仅在理论上有着清晰的物理图像，在实验上也能通过简单的方式实现，并且是很好的软 x 射线光源，具有相干性、单光子能量高、脉冲持续时间短等优点。将阿秒脉冲超短的时间尺度与冷靶反冲离子动量成像谱仪系统强大的符合测量能力有效的结合在一起。由于阿秒脉冲长度小于电子运动过程的时间尺度，采用泵浦探测技术能使人们认清复杂动力学过程中电子运动的中间过程。并且，COLTRIMS 系统的符合测量能力使人们在阿秒时间尺度下同时研究电子和核的运动成为可能，这将极大的改善人们对于微观超快过程的认知和操控能力。

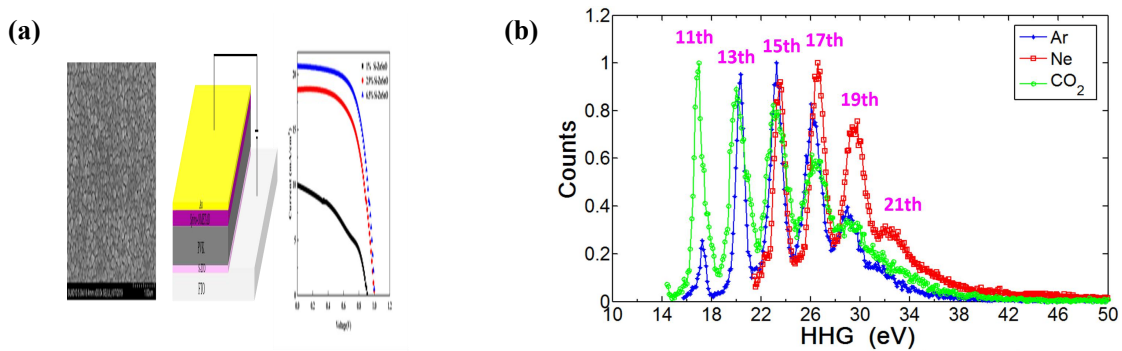


图 1: (a) 阿秒脉冲与 Ar 原子气体相互作用后产生的电子动量积分谱; (b) 同一光源下电离混合气体重构出的高次谐波谱。

关键词：阿秒脉冲，COLTRIMS，符合测量，超快动力学

参考文献

- [1] Ullrich J, et al. Recoil-ion and electron momentum spectroscopy [J]. Reports on Progress in Physics, 2003, 66(9):1463-1545.
- [2] Zewail A H. Femtochemistry: ultrafast dynamics of the chemical bond [M]. World Scientific, 1994.
- [3] Paul P M, et al. Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation [J]. Science. 2001, 292 (5522).

基金项目：国家重点基础研究发展计划（2013CB922203），国家重大研究计划（No. 91850201）

Q-P022

专题代号：Q

Acoustic waves undetectable by transient reflectivity measurements

Chuan He,¹*

¹ School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, No. 5 yard, Zhong Guan Cun South Street, Beijing 100081, PR China (e-mail: chuan.he@bit.edu.cn)

Abstract:

A free-standing GaAs membrane is investigated by pump-probe reflectivity measurements with femtosecond laser pulses of 400-nm wavelength. It is found that the detected wide spectrum of laser-generated coherent strain waves in the membrane does not contain a specific hypersonic frequency. Theoretical analysis

reveals that this effect is related to zero sensitivity of the acousto-optic detection at a particular frequency defined by the wavelength of the probe laser pulse on the mechanical free surface of the GaAs membrane. We predict that a similar behavior is expected in Si and Au membranes and films, indicating that the presence of zeros in the spectral transformation function of acousto-optic conversion is a rather general phenomenon in picosecond ultrasonics that has so far been neglected.

Key word: acoustic waves; transient reflectivity measurements;

Q-P023

专题代号: Q

基于飞秒光纤诱导击穿光谱技术的树木种类及生长环境的远程区分

付尧、侯梦瑶、徐淮良*

吉林大学电子科学与工程学院, 长春 130012

Email: huailiang@jlu.edu.cn

摘要: 将树木表皮样品用作环境指示器来监测树木生长环境状况的方法以其成本低, 监测范围大等特点, 日益受到人们关注, 但是对树皮样品进行远程元素分析目前还较难实现。我们提出了一种基于飞秒光纤诱导击穿光谱技术的树皮元素的远程分析方法, 并实现对树木种类和生长环境的同时区分。通过 2 米的聚焦透镜对波长为 800 nm, 脉宽为 40 fs 的激光脉冲聚焦, 在空气中形成 10-15 cm 长的光丝。我们采集了来自长春市两个不同地区 (国家公园和商业中心) 的柳树, 松树和杨树树皮样品进行飞秒光纤诱导击穿光谱的测量。采用背向收集的方法收集光丝诱导的等离子体荧光, 获得了树皮样品内外表面的 CN, C2 的分子谱线和 K, Ca, Mg, Na, Sr, Ba, Al, Fe, Mn 的原子谱线。结合主成分分析的方法, 我们实现了对树木种类和生长环境的同时区分。我们的方案为远程、快速、原位探测树木种类和生长环境提供了可能。

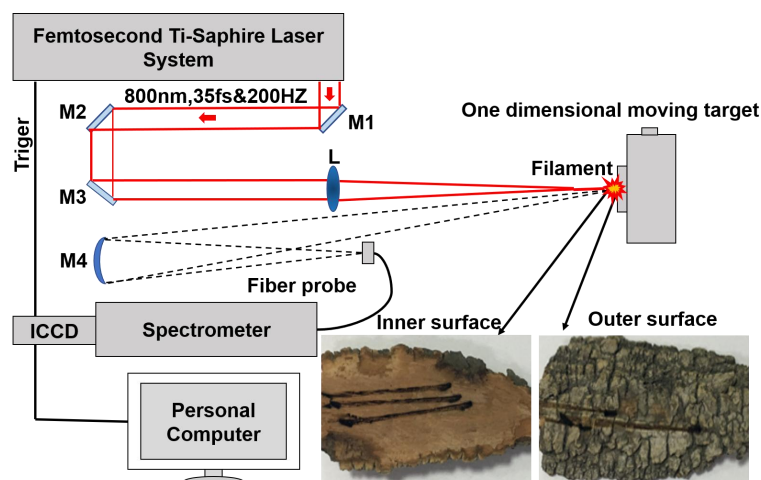


图 1 飞秒激光诱导击穿光谱实验装置

关键词：飞秒光纤诱导击穿光谱技术，树皮，主成分分析方法

参考文献

- 【1】 *H.L. Xu et al.*, Femtosecond laser ionization and fragmentation of molecules for environmental sensing, *Laser Photonics Rev.* 2015,9,275.
- 【2】 *H.L. Xu et al.*, Remote time-resolved filament-induced breakdown spectroscopy of biological materials, *Opt. Lett.* 2006,31, 1540.

Q-P024

专题代号：Q

一氧化碳分子在少周期激光场中产生高次谐波的多轨道效应

栗建科^{1,2,3}、舒正²、胡师林⁴、陈京²、刘小井^{1,3}

1. 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院，北京 100191
2. 北京应用物理与计算数学研究所，北京 100088
3. 上海科技大学，上海 201210
4. 中山大学珠海分校物理与天文学院，珠海 519082

Email: chen_jing@iapcm.ac.cn

摘要：在分子与强激光相互作用产生高次谐波（HHG）过程中，多电子效应十分重要。此时基于单电子近似下的一些理论和模型不再适用，只能借助考虑多电子效应的理论方法，比如含时密度泛函理论（TDDFT）和含时 Hartree-Fock 理论（TDHF）等。这里我们利用 TDHF 理论研究了 CO 分子在少周期激光场中产生高次谐波的多轨道效应^[1]。我们采用 3 周期 \sin^2 包络激光场（偏振方向平行于分子轴），波长 800nm、光强 $2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ，通过理论计算发现 CO 分子的谐波谱在 cutoff 附近有一个极小值，正是由于 HOMO（ 5σ ）和 HOMO-2（ 4σ ）之间的干涉导致的。而且极小值会随着少周期激光场载波包络相位（CEP）和场强的改变而移动。但是当我们冻结 HOMO-1（ 1π ）时，干涉极小值却消失了。经过分析我们发现，这是由于 1π 影响了 5σ 与 4σ 之间的耦合造成的。当我们冻结 1π 时， 1π 电子云主要集中在 O 端，会形成一个极化场，对外场强度造成一定程度地增强（当电场指向 O 端）或减弱（当电场指向 C 端），而外场强度对 5σ 与 4σ 之间的耦合效应影响很大，进而改变了谐波发射过程中 5σ 通道和 4σ 通道之间的相位差（图 1），导致干涉极小值的消失。我们的结果有助于理解极性分子的结构特性以及在外场中的多电子动力学行为，并且为实验上测定少周期激光场 CEP 提供了一个思路。

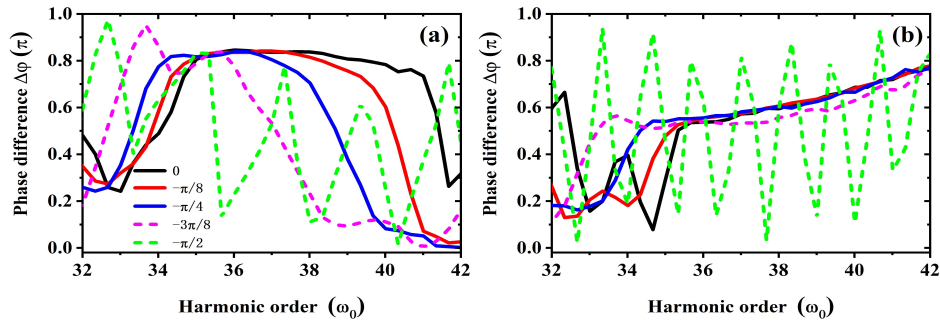


图 1 不同 CEP 下 HOMO 与 HOMO-2 谐波通道的相位差 (a) 没有冻结 HOMO-1 (b) 冻结 HOMO-1

关键词：高次谐波 干涉极小值 极化场 耦合效应

参考文献

- 【1】 O. Smirova, Y. Mairesse, S. Patchkovskii, N. Dudovich, D. Villeneuve, P. Corkum, and M. Y. Ivanov, High harmonic interferometry of multi-electron dynamics in molecules, *Nature (London)*, 2009, 460, 972.

Q-P025

专题代号：Q

Rescattering time-energy analysis of higher-order above-threshold ionization in few-cycle laser fields

L Guo¹, S Chen², S L Hu³, R H Lu¹, S S Han¹, and J Chen^{2,4}

¹Key laboratory for Quantum Optics and Center for Cold Atom Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

²HEDPS, Center for Applied Physics and Technology, Collaborative Innovation Center of IFSA, Peking University, Beijing 100084

³Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Metrology, School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082

⁴Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088,

Email: guoli@siom.ac.cn; chen_jing@iapcm.ac.cn

Abstract: We use the Wigner distribution-like function (WDL) based on the improved strong field approximation theory (ISFA) to obtain the rescattering time-energy (higher kinetic energy) distribution (RTED) of the rescattering electrons ionized by few-cycle laser fields with four different frequencies. The semiclassical results are given by the simple-man method with considering different tunnel exits and the initial longitudinal momenta at the tunnel exit. Comparison between the central maxima of the outmost stripes in the RTED and the semiclassical results indicates the existences of the tunnel exit and it becomes closer to the core with the increasing frequency. Our results also imply that the effect from the tunnel exit is more important than that from the initial longitudinal momentum at

the tunnel exit for the backward-scattering electrons. Moreover, we give the origins of the stripes appearing in the RTED and find that the existence of the interference between electrons with only long or short orbits.

Keywords: Wigner distribution-like function; Higher-order above threshold ionization

【1】 L. Guo, S. S. Han, and J. Chen, Time-energy analysis of above-threshold ionization, *Opt. Express*. 2010, 18, 1240-1248.

【2】 L. Guo, S. S. Han, and J. Chen, *Phys. Rev. A*. 2012, 86, 053409.

【3】 L. Guo *et al.*, Accuracy of the semiclassical picture of photonization in intense laser fields <https://arxiv.org/abs/1905.00213>.

Foundation project: National Natural Science Foundation (NO. 11774361, 11775286, 11425414 and 11804405)

Q-P026

专题代号: Q

Direct and stand-off fabrication of black silicon with enhanced absorbance in the short-wavelength infrared region using femtosecond laser filament

Yue Su, Xuepeng Zhan, Hongwei Zang and Huailiang Xu*

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, 2699 Qianjin Street, Changchun 130012, China

Email: huailiang@jlu.edu.cn

Abstract: We report on the experimental demonstration of a technique for rapid fabrication of black silicon with enhanced absorption in the short-wavelength infrared (SWIR) region, directly in the ambient air, and at a standoff distance of about 1 m. Our approach is based on the irradiation of a surface of the crystalline silicon, coated by a 100-nm-thick aluminum film, by femtosecond laser pulses that are propagating in the air in the self-channeling regime known as laser filamentation ^[1,2]. In Fig. 1a-c, which correspond to different partitioning of the processed sample between the filament and the reservoir parts of the laser beam, the application of aluminum coating prior to the laser irradiation improves the absorptivity, most notably in the SWIR spectral range. For the case of Fig. 1b, which shows the data for nearly optimal processing conditions, the maximum improvement of absorption, relative to the case of laser-processed sample without Al coating, is by as much as 50%. The maximum improvement occurs in the wavelength range between 2.0 and 2.5 μ m. Microscopic and elemental analyses of the processed samples suggest that the absorptivity enhancement is due to both the changes in the morphology of the microstructures formed on the sample surface by the laser irradiation and the modification of the energy-band structure of silicon, as a result of aluminum implantation. Our technique could enable rapid and cost-effective fabrication of silicon-based opto-electronic devices for

applications in the infrared spectral range.

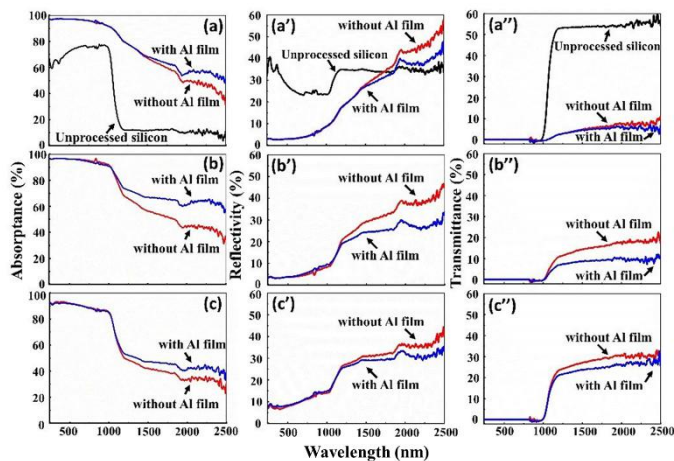


Fig 1. Absorption spectra of the fabricated black silicon computed from (a', b', c') reflection and (a'', b'', c'') transmission spectra, under different processing conditions, and for the cases with and without the aluminum coating applied prior to the laser irradiation. Scanning speed is 2.5 mm/s in all cases, corresponding to about 20 laser shots consecutively hitting the same spot on the sample. The distances between individual processed lines are 100 μm (a, a', a''), 300 μm

(b, b', b''), and 500 μm (c, c', c''). The data for bare (unprocessed) silicon are also shown, for comparison.

Keywords Black silicon, Aluminum coating, Absorptivity enhancement, Infrared, Femtosecond laser filamentation

References

- [1]. H. L. Xu, Y. Cheng, S. L. Chin, H. B. Sun, Femtosecond laser ionization and fragmentation of molecules for environmental sensing, *Laser Photonics Rev.* 9 (2015) 275–293.
- [2]. S. L. Chin, *Femtosecond Laser Filamentation*, Springer, New York, 2010.

Q-P027

专题代号: Q

氦原子在长波长强激光下的 Rydberg 态的激发

刘明清¹、徐松坡²、胡师林³、全威²、柳晓军²、陈京¹

1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

2. 武汉物理与数学研究所, 武汉 430071

3. 中山大学珠海分校, 珠海, 510082

Email: liuphys@outlook.com, chen_jing@iapcm.ac.cn

摘要: 在强激光场下, Rydberg 态的激发过程一直是强场物理领域中原子与激光相互作用的关键问题之一。其中内在的物理机制始终没有定论, 因为没有精确的理论可以解释实验上所有的奇特现象。电子在受到强激光场的作用下, 在隧穿出口电离, 随后在激光场下演化运动, 如果电子回到原子核附近再次散射, 会产生一系列强场物理现象 (阈上电离、非次序双电离、高次谐波产生)。但是, 对于 Rydberg 态的激发而言, 并未有真正的电子电离出去。我们知道动能很小的电子才能被俘获, 在长波长激光场下, 能谱会存在低能结构 (LES) [1], 极大地影响 Rydberg 态的激发过程。

为了解释 Rydberg 态的激发, 我们发展了一种新的量子模型来研究其内在机制。在长波长激光场下 (1800 nm), 按照先前通道关闭理论 (channel closing), Rydberg 态激发概率与强度呈现明显的间

隔大约在 2.27 TW/cm^2 的峰结构。但是实验上和 TDSE 的结果[2]约为 50 TW/cm^2 。我们认为在此波长下，电子在返回核附近发生了前向散射，有着比较小的动量，然后在随后的运动中被俘获。我们基于此物理图像计算了激发概率，与实验结果和 TDSE 结果有着比较好的吻合。

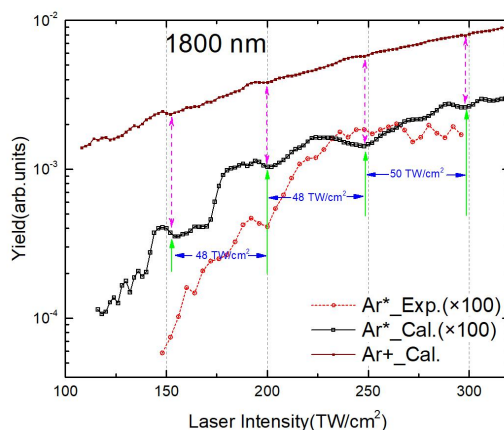


图 1 Rydberg 态激发概率与波长 1800 nm 的激光强度的关系，并与实验做了比较。

关键词：低能结构、Rydberg 态激发、强场近似

参考文献

- 【1】 W. Becker *et al.*, Low-energy electron rescattering in laser-induced ionization, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2014. 47, 204022.
- 【2】 B. Piraux, *et al.*, Excitation of Rydberg wave packets in the tunneling regime, *Phys. Rev. A* 2017. 96, 043403

基金项目：国家自然科学基金项目 (NO. 11334009)

Q-P028

专题代号：Q

基于 Si-ZnSnO 电子传输层的钙钛矿太阳能电池研究

苗少帅¹，杨倩倩¹，郭艳如²，袁帅²，金泽珠²，朱东萍²，艾希成²

¹北京工业大学数理学院，北京市 100124；²中国人民大学理学院化学系，北京市 100872

Email: yangqianqian@bjut.edu.cn

摘要：太阳能是一种储量无限的清洁能源，可以用来满足日益增长的能源需求。将太阳能转化为电能是目前太阳能利用最有效的策略。近年来，低成本、高效率的钙钛矿太阳能电池正在迅速发展，光电转换效率从不足 3% 迅速增长到 25.2%。钙钛矿太阳能电池器件结构种类繁多，但主要包括电子传输层、钙钛矿活性层、空穴传输层和电极四部分，其中电子传输层多采用透明金属氧化物材料如 SnO_2 、 ZnO 等。针对钙钛矿太阳能电池的潜在商业化，对其功能层进行升级处理是至关重要的。此外， ZnSnO 具有可见光波段的高透过率、高迁移率和稳定性好的优点。某种程度上 Si 的引入可以促进非晶的形成，适量

Si 掺杂 ZnSnO 可以有效的减少氧空位，提高薄膜的导电性能。

课题组采用射频磁控溅射的方法制备了不同 Si 含量掺杂的非晶金属氧化物薄膜 Si-ZnSnO，并对薄膜的表面形貌、电学性质和光学性质进行了表征。磁控溅射方法制备的薄膜稳定性好，可重复性高，为未来钙钛矿太阳能电池商业化的大面积制备提供可能。在此基础上制备了完整的太阳电池器件，基于 Si-ZnSnO 为电子传输层的钙钛矿太阳能电池最高得到 13.4% 的光电转化效率，开路电压为 1.04V，短路电流 21.6mA/cm²。填充因子 0.67。Si-ZnSnO 薄膜作为钙钛矿太阳能电池电子传输层具有重要的研究价值。

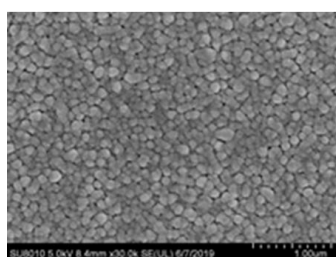


图 1

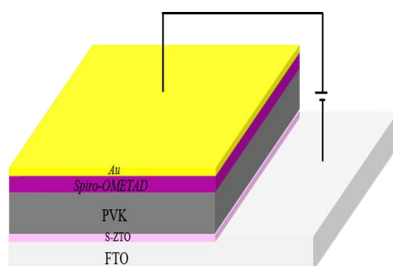


图 2

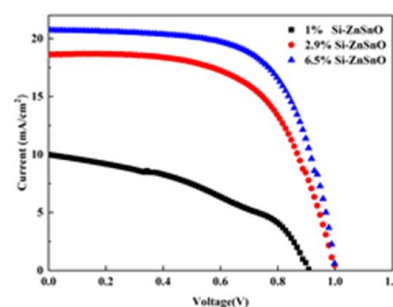


图 3

图 1 Si-ZnSnO 薄膜 SEM 形貌图；图 2 电池结构图；图 3 不同 Si 掺杂浓度的电池效率图

关键词： Si-ZnSnO 钙钛矿太阳能电池 电子传输层 射频磁控溅射

基金项目：国家自然科学基金项目 (NO. 21473250、NO. 21773305)

Q-P029

专题代号：Q

Electrons dynamics in sequential double ionization of Mg driven by the circularly polarized laser pulses

Yiguang Zhao, Jingkun Xu, Qianqian Han, Yingbin Li, Qingbin Tang*, Benhai Yu[#]

College of Physics and Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000

Email:qingbintang@163.com, hnyubenhai@163.com

Abstract: The emission dynamics of two electrons from sequential double ionization of Mg driven by strong circularly polarized laser pulses is investigated with the three-dimensional classical ensemble approach. The

numerical results show that the momentum spectra of the doubly charged ions exhibit the pronounced double-ring structure and the relative yield of the double rings depends on the laser wavelength of the driving pulses. By back tracing the classical trajectories, it is found that the ionization of the two electrons are clustered in two time windows during the laser pulses and the two rings in the ion momentum spectra are determined by the time delay between the emission of the two electrons. As the wavelength increases, the time window for the first electron moves forward gradually, which result in the more favorable side-by-side emission of the electron pairs and thus the enhancement of the outer rings in the ion momentum spectra. Our results imply the ion momentum distribution is a sensitive indicator for dynamics of the electron emission in SDI and this sub-cycle emission could be accurately adjusted by the wavelength of the driving pulses.

Keywords: strong-laser field, sequential double ionization, electron dynamic

References

- [1] Markus S. Schoffler, Xinhua Xie, *et al.*, Laser-subcycle control of sequential double-ionization dynamics of helium, *Phys. Rev. A.* 2016, 93(6), 063421.
- [2] Philipp Wustelt, Max Moller, *et al.*, Numerical investigation of the sequential-double-ionization dynamics of helium in different few-cycle-laser-field shapes, *Phys. Rev. A.* 2017, 95(2), 023411.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO.61575169, NO.61475132, NO.11747077)

Q-P030

专题代号: Q

CS₂ 多光子吸收的复杂超快动力学机制分析

张云峰, 隋来志, 李苏宇*, 金明星*

吉林大学原子与分子物理研究所, 吉林 130012

Email: yfzhang17@mails.jlu.edu.cn

摘要: CS₂ 作为一种十分常见的液体材料, 在非线性光学, 超快等领域中的研究十分广泛和深入。但近几年来, 其部分基于复杂超快动力学的现象依然没有被解释清楚, 如 CS₂ 的电离阈值高达~10 eV[1], 然而其在 1.55 eV (800 nm) 的激发下, 即使只有低至 5GW/cm² 的光强, 便可成丝产生等离子体; 790 nm 左右的双光子吸收机制被认为几乎不存在[2], 但在几 ps 的延迟内依然可以观测到泵浦光为 395 nm 时对中心波长 790 nm 左右的光的吸收等奇异现象。

为了解释其中的超快动力学机制，我们利用飞秒激光瞬态吸收系统对 CS₂ 在 790 nm 附近的瞬态吸收现象进行了研究。我们在 790 nm 和 395 nm 两种泵浦模式下，观察其对于中心波长 790 nm 左右的探测光的吸收，发现 CS₂ 存在双光子吸收和激发态吸收等多种机制，并通过频谱分析和主成分分析 (PCA) 提取出了对于该过程中最为重要的对应着几个不同光谱成分的共振跃迁过程，从而对其复杂的超快动力学机制进行更深一步的探索和梳理。

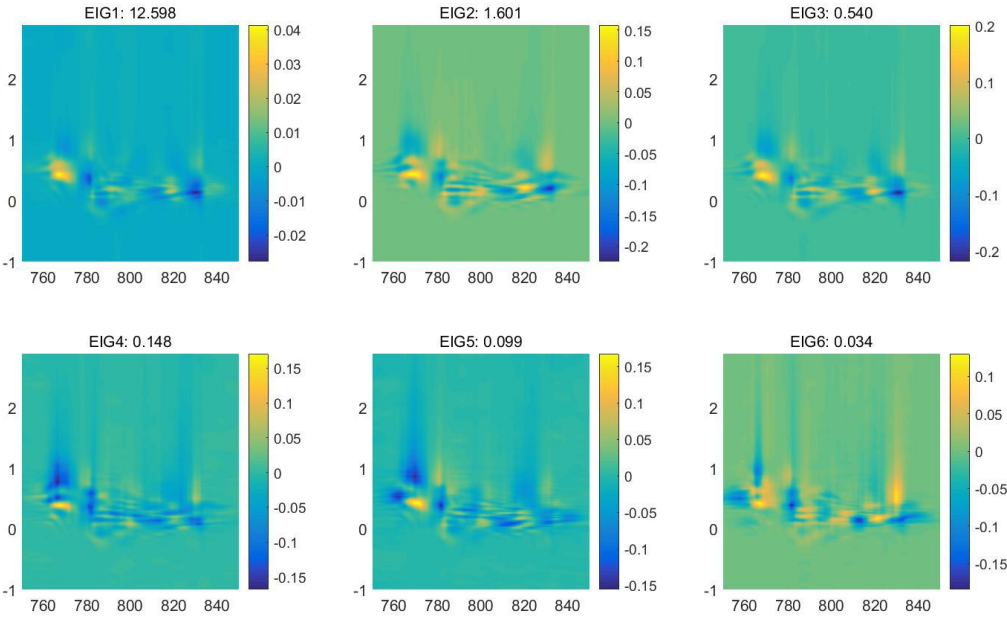


图 1 两种泵浦模式下瞬态吸收光谱的主成分分析

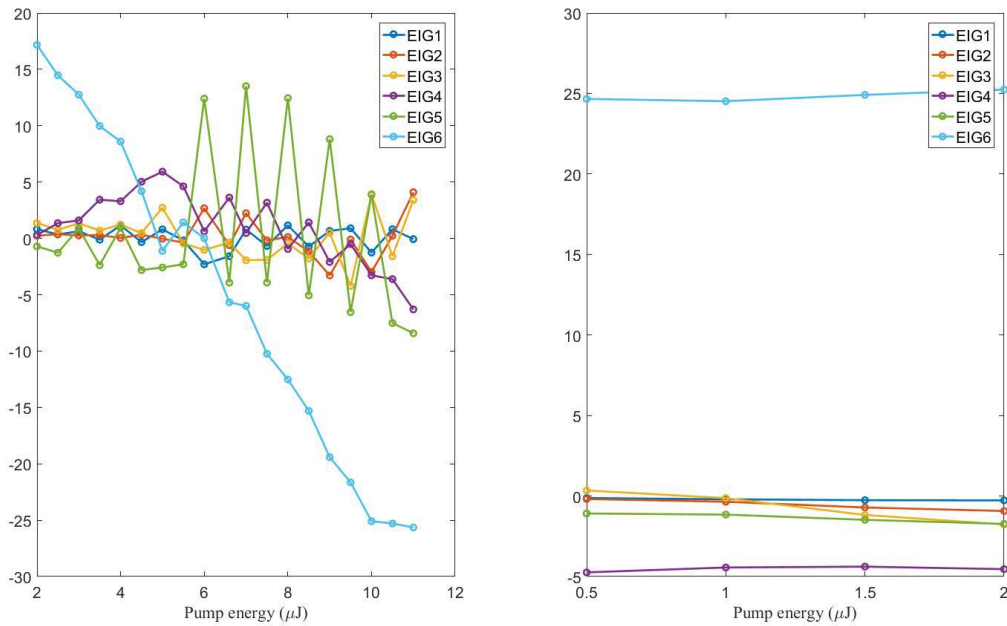


图 2 两种泵浦模式向主成分空间的投影

关键词：超快动力学，多光子吸收，主成分分析

参考文献

1. M. P. Shortell, E. A. Jaatinen, J. Chang, and E. R. Waclawik, "Using pulse transit delay in Z-scan to discriminate between excited-state absorption and other nonlinear processes in ZnO nanocones," *Optics Express* **22**, 6222-6228 (2014).
2. M. Reichert, H. Hu, M. R. Ferdinandus, M. Seidel, P. Zhao, T. R. Ensley, D. Peceli, J. M. Reed, D. A. Fishman, S. Webster, D. J. Hagan, and E. W. Van Stryland, "Temporal, spectral, and polarization dependence of the nonlinear optical response of carbon disulfide," *Optica* **1**, 436-445 (2014).

基金项目：国家自然科学基金项目 No. 11674128 等

Q-P031

专题代号：Q

全无机钙钛矿电池材料的光生载流子输运机理的超快光谱研究：钙钛矿尺寸效应

安洁，席文迪，都鲁超*

吉林大学原子与分子物理研究所，长春 130012

lcdu@jlu.edu.cn

摘要

全无机钙钛矿太阳能电池由于具有比有机-无机杂化钙钛矿材料更高的稳定性，且制造过程简单，

成本低廉的优点，受到研究者的广泛关注。钙钛矿材料具有极长的载流子传输距离、极低的缺陷态密度、很高的光吸收系数等优异性质。全无机钙钛矿太阳能电池材料当中的光生载流子输运机理对太阳能电池的设计具有非常重要的意义。我们拟通过改变 CsPbBr₃ 的尺寸来探测光激发的条件下光生载流子的输运过程。我们采用改变反应温度（145℃、155℃、165℃）实现对全无机钙钛矿纳米材料的尺寸调控，温度越高，样品尺寸越大。研究光激发条件下不同尺寸的 CsPbBr₃ 与 TiO₂ 组装形成的复合结构的界面光生载流子的分离，扩散及复合过程。我们对不同尺寸 CsPbBr₃ 与 TiO₂ 的组装体系的飞秒瞬态吸收光谱进行全局拟合，得到四个动力学组分，分别为热载流子冷却，自由激子形成，界面电荷转移和电荷复合。我们发现，165℃条件下制备的样品体系中，电荷转移和电荷复合的时间最长，说明在该条件下，制备的样品更有助于光电转化效率的提高，源于大尺寸样品的低缺陷态密度。当温度从 145℃ 升高到 165℃ 时，钙钛矿尺寸越来越大，而缺陷态密度逐渐减小，电荷转移和电荷复合时间呈现上升趋势。我们的实验结果显示 165℃ 时制备的钙钛矿材料更有助于光电转化效率的提高。

关键词:飞秒瞬态吸收光谱 全无机钙钛矿 电池材料 全局拟合 尺寸效应 电荷转移 电荷复合

参考文献

- 【1】 Abhishek Swarnkar; Ashley R. Marshall; Erin M. Sanchez; Boris D. Chernomordik; David T. Moore; Jeffrey A. Christians; Tamoghna Chakrabarti; Joseph M. Luther, Quantum dot-induced phase stabilization of a-CsPbI₃ perovskite for high-efficiency photovoltaics, *Science*. 2016, 354(6308), 92-95.
- 【2】 Loredana Protesescu; Sergii Yakunin; Maryna I. Bodnarchuk; Franziska Krieg; Riccarda Caputo; Christopher H. Hendon; Ruo Xi Yang; Aron Walsh; and Maksym V. Kovalenko, Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites (CsPbX₃, X = Cl, Br, and I): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut, *Nano Lett.* 2015, 15, 3692–3696.