

ICF 靶功能材料研究设想

唐永建^{1,2}

¹西南科技大学, 四川省绵阳市青龙大道中段, 621010

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川省绵阳市 919-981 信箱, 621900

Email: tangyongjian2000@sina.com

在实现惯性约束聚变燃烧过程中, 物理设计的核心是一个将驱动能量进行优化分配控制的过程。如何实现这一过程? 则聚变靶的结构设计、功能材料组合将是关键环节。报告从激光惯性约束聚变(ICF)靶材料类别与物理作用展开了讨论, 提出了激光能量转换、辐射烧蚀、结构储氢、聚变裂变助推等四类功能材料研究设想。

1. 激光转换材料

通过激光与靶物质相互作用研究不同能量辐射源的增强辐射和定向发射功能材料, 并将研究基础建立在各材料原子的电子数目、轨道结构、空间分布等参数与光谱特征上。在间接驱动空腔靶材料的研究中, 将调整腔壁材料的等离子体辐射自由程增加其辐射不透明度, 从而其控制反常吸收, 增大逆韧致吸收辐射能量, 实现黑腔辐射耦合效率的提高。为此, 根据激光辐射转换性质提出了研制具有纳米阵列和表面调制的结构材料、低密度高Z(如: 金、铀、铀等)泡沫材料, 以及不同辐射自由程的金属复合团簇材料、表面自旋极化共振吸收(SPR)材料研究设想。目前, 部分研究结果已经得到了物理实验的验证。

2. 辐射烧蚀材料

烧蚀材料的作用是将腔内辐射能吸收并转换为驱动压力的动能, 吸收能量越多, 驱动能力越强。烧蚀层材料掺杂目的是控制烧蚀层与DT界面的稳定性, 减少超热电子的预热, 并降低壳层界面不稳定性增长。烧蚀层的厚度与驱动源温度高低、脉冲形状、脉冲宽度和谱分布有关, 存在一个最佳厚度。在烧蚀材料研究中, 报告提出了对辐射能量调控的六项设计理念, 即: 吸得多、憋得住、烧得起、推得动、压得紧、稳得住。同时, 利用材料结构和掺杂材料辐射吸收特性中的动量凝聚和功率放大原理, 提出了梯度储能材料研究中的灰笼模型(表面冷中间热)功能材料设计概念, 开展了阵列碳纳米管电子定向输运材料实验研究。

3. 储氢功能材料

金属氢同位素是ICF最为理想的聚变燃料。由于人类还没有研制出能够应用的金属氢材料。因此, 寻找高密度固体储氢替代材料是聚变能应用研究的当务之急。目前, 已经达到液氢密度(0.07g/cm^3)的储氢材料有硼氢化锂(LiBH_4) 储氢密度 0.13g/cm^3 ; 氢化铍(BeH_2) 储氢密度 0.14g/cm^3 。另外, 我们在化学储氢材料研究基础上, 提出了结构储氢的研究设想, 开展了单原子氢注入状态下, 组合纳米结构碳气凝胶材料储氢行为研究, 探讨了核自旋极化、 μ 子催化、小氢原子等新概念新功能氢同位素材料的科学和技术问题。

4. 聚变裂变放能助推材料

由于铀、钚等裂变材料在中子的作用下将释放大量的核能, 如: $^{235}\text{U}+n\rightarrow^{139}\text{Xe}+^{95}\text{Sr}+2n$ 反应可释放约 $3.2\times 10^{-11}\text{J}$ 的能量。如果将一次脉冲聚变燃烧中子数($10^{17}\text{-}10^{19}$)用于铀-238裂变放能, 可产生10-100MJ的核裂变能。因此, 报告提出了开展聚变、裂变放能助推靶材料的研究设想。通过简单计算, 壁厚1微米、直径5微米的单个氘氟化铍靶丸, 一次性皮秒脉冲辐射冲击加热聚变放能约0.76J能量。如果在聚变靶丸壳层材料内加载百万个梯度微纳结构氘氟化铍胶囊, 将获得约0.5MJ的壳层内部助推压缩能。同样, 在理想情况下, 如果将这些微纳聚变胶囊放置在铀U-238激光能量转换腔体内, 将获得几十倍聚变的核裂变能。这一设想如果能够实现, 则将缓解聚变燃烧中的辐射驱动能量不足的问题。

等离子体磁光学及其应用

翁苏明、赵前、郑小龙、陈民、盛政明、张杰

上海交通大学物理与天文学院激光等离子体实验室, 上海 200240

Email: wengsuming@gmail.com

摘要: 随着激光峰值功率的不断提高, 产生以及操控高功率激光脉冲变得越来越具有挑战。这是因为传统的固体光学元器件必须随着激光峰值功率的提高而不断地增大口径, 以保证单位面积上的激光能量密度低于光致损伤阈值。一般情况下, 拍瓦级的高功率激光装置已经需要配套的光学元器件口径达到米量级。如此大口径的光学元器件不仅制造成本高昂, 往往还需要很长的加工周期, 并且在技术上也是极具挑战的。与固体光学元器件相比, 基于等离子体的光学元器件具有极高的光致损伤阈值, 这为产生以及操控超高功率的激光脉冲提供了一套非常具有吸引力的解决方案。而磁光学方法作为经典的光学操控和测量手段, 一直在电磁波的偏振和相位调制以及磁场测量等方面具有广泛的应用。

我们将等离子体光学与磁光学的优势相结合, 提出了等离子体磁光学的概念, 基于此可调制超高功率激光脉冲的偏振、相位、强度等参数: 譬如产生超高功率的圆偏振激光脉冲【1,2】用于激光驱动的离子加速等应用【3】; 以及实现激光脉冲的快速动态聚焦【4】。此外, 强磁场对激光等离子体相互作用的具有重要的影响, 我们将着重讨论强磁场对激光尾波场电子加速的影响【5,6】。

关键词: 等离子体光学、激光等离子体、高功率激光、激光尾场电子加速、偏振、磁光学
参考文献

- 【1】 S. M. Weng, Q. Zhao, Z. M. Sheng *et al.*, Extreme case of Faraday effect: Magnetic splitting of ultrashort laser pulses in plasmas, *Optica* 2017, 4(9), 1086.
- 【2】 X. L. Zheng, S. M. Weng, Z. Zhang *et al.*, Simultaneous polarization transformation and amplification of multi-petawatt laser pulses in magnetized plasmas, *Optics Express* 2019, 27(14), 19319.
- 【3】 X. L. Zheng, S. M. Weng, H. H. Ma *et al.*, Control of laser light by a plasma immersed in a tunable strong magnetic field, *Optics Express* 2019, 27(16), 23529.
- 【4】 S. M. Weng, M. Liu, Z. M. Sheng *et al.*, Dense blocks of energetic ions driven by multi-petawatt lasers, *Scientific Reports* 2016, 6, 22150.
- 【5】 Q. Zhao, S. M. Weng, Z. M. Sheng *et al.*, Ionization injection in a laser wakefield accelerator subject to a transverse magnetic field, *New J. Phys.* 2018, 20(6), 063031.
- 【6】 Q. Zhao, S. M. Weng, M. Chen *et al.*, Sub-femtosecond electron bunches in laser wakefield acceleration via injection suppression with a magnetic field, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 2019, 61(8), 085015.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11975154、11675108), 国家青年千人项目

非平衡电磁场及高亮度 X 射线源产生

王剑^{1*}, 朱斌², 谷渝秋²

1、内江师范学院 物理与电子信息工程学院

2、高温高密度等离子体重点实验室

Email: abie007@163.com

摘要:

通过激光与微结构靶的相互作用,我们提出了一种通过不平衡(准静态)电磁场产生高通量同步辐射的方法,即采用紧凑型空心等离子体波导和微丝阵列,形成了非平衡(准静态)电磁场,进而产生 X 射线。在前一种情况下,当脉冲与紧凑型空心等离子体波导耦合时,线偏振激光脉冲在波导中传播,主要转换为电磁模式 HE_{11} ,该电磁模式相速度约为 $1.02c$ 。该模式的瞬态电场和磁场不平衡,导致高能电子产生强烈的振荡力和较短的振荡周期,并通过纵向加速机制进行加速,产生单发包含 10^{11} - 10^{12} 光子的 X 射线脉冲,相应的光子通量达到 3.5×10^{21} photons/s 0.1% bandwidth。对于后一种情况,在类似的激光参数下,建立在微丝表面的不平衡准静态电场和磁场也能产生 10^{10} 个光子,光子能量为数十 keV。此外,如果进一步即将激光脉冲和高能电子同时导引到微丝阵列中,我们甚至可以在百太瓦激光装置上获得能量为 MeV 且发散角小于 1° 的高准直性 γ 光子束。

关键词: 非平衡电磁位形; 高亮度 X 射线源;

参考文献

- 【1】 王剑, 朱斌, 余同谱等. High-flux x-ray photon emission by a superluminal hybrid electromagnetic mode of intense laser in a plasma waveguide. 2019, 61(8): 085026.
- 【2】 王剑, 朱斌等. Brilliant x-ray emission through weakly unbalanced quasi-static electric and magnetic fields. 2019, submitted.

R004

专题代号：R

**Shaping of ion energy spectrum due to ionization in ion acceleration
driven by an ultra-short pulse laser**

余金清

湖南大学物理与微电子科学学院

Email: jinqing.yu@hnu.edu.cn

In the interaction between an ultra-short laser pulse and an ultra-thin film target, field ionization dominates the plasma formation. The charge and density distribution of the plasma are determined by the laser pulse and the target, and play a crucial role on the following ion acceleration process. In this paper, we study the role of ionization in laser ion acceleration with particle-in-cell simulations. The ion energy spectra in the simulations including ionization are significantly shaped comparing with those from the simulations using a pre-ionized plasma. The shaping of the ion energy spectra is robust in a wide parameter range, in term of laser temporal profile, intensity, duration and target material. This work also shows the possibility to generate quasi-monoenergetic ion beams resulted by ionization. The benchmark simulation well reproduces the narrow bandwidth ion energy spectra, the evolution of the particle number with charge state, and the leaps on the ion energy, those observed in the previous experiments. This study reveals the necessity to include ionization in modeling laser ion acceleration, and provides an approach to understand the shaping of ion energy spectra in the experiments.

小型激光脉冲中子源：进展与挑战

谷渝秋

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

Email: yqgu@caep.cn

脉冲中子源在核物理、材料科学、无损检测技术方面具有广泛的应用，传统的中子源通常需要用核反应堆或庞大的高能加速器，从而限制了中子源的应用。随着激光技术的发展，基于超短超强激光的脉冲中子源有可能成为一种新型的台面中子源。这种中子源具有短脉冲、小焦点等特点，具有广泛的潜在应用，然而目前的激光中子源在中子产额方面还面临技术挑战。本文将介绍中国工程物理研究院激光聚变研究中心在发展激光中子源方面的研究进展。主要介绍利用激光尾场电子加速技术的光核中子源和利用激光质子加速的 (p,n) 和 (D,n) 反应的中子源研究目前进展和面临的挑战。

R006

专题代号：R

双面激光加热金刚石压砧（LHDAC）的高能量密度条件

雷力

四川大学

lei@scu.edu.cn

双面激光加热金刚石压砧（LHDAC）是高温高压极端条件物理研究的重要实验技术。LHDAC 技术是通过两颗宝石级金刚石压砧相向挤压，在压砧尖端产生大于 200GPa 以上的高压；同时，两束高功率激光经过金刚石单晶，分别从相对的两个方向聚焦到压砧顶端样品的上下表面，产生 3000K 以上高温。LHDAC 可结合瞬态/稳态原位拉曼散射、吸收/反射光谱、荧光光谱等多种光谱手段，是探索高能量密度物理的重要实验技术之一。此次报告我将介绍四川大学极端条件光谱平台关于 LHDAC 研究进展，讨论 LHDAC 实验技术与其高能量密度条件，此外，还将介绍我们近期在高能量密度聚合氮方面的研究结果。

激光驱动分段管内的级联离子加速

贺昊¹²³, 乔宾³, 沈晓飞³, 姚伟鹏³, 姚屹林³, 裴文兵², 傅思祖²

1、复旦大学物理学院, 上海 200433

2、上海激光等离子体研究所, 上海 200088

3、北京大学应用物理与技术研究中心, 北京 100871

Email: bqiao@pku.edu.cn

摘要: 本文提出了一种用强激光脉冲驱动一系列串联的分段管, 来实现级联离子加速的方案。首先, PW-ps 激光脉冲在第一管段中驱动无碰撞激波离子加速(CSA)过程, 产生高通量的初级离子束。之后, 当离子束通过每个后续管段的同时, TW-fs 激光脉冲在各管段中驱动磁涡旋加速(MVA)过程, 使离子以级联的方式多次加速。该级联方案除了能提高离子束的最大能量, 还可以通过控制 fs 激光的延迟以及管段之间的真空间隔, 来筛选和调整离子的能谱, 进而获得准单能离子束。二维粒子模拟(PIC)结果表明, 利用强度为 $8.8 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ 的一束 1ps 激光和两束 100fs 激光, 只需经过两次级联加速, 就可以将最大离子能量从 123MeV 提升至 181MeV。

关键词: 激光离子加速, 级联加速

参考文献

- 【1】 KAR S, AHMED H, PRASAD R 等. Guided post-acceleration of laser-driven ions by a miniature modular structure[J]. Nature Communications, Nature Publishing Group, 2016, 7: 1–7.
- 【2】 HE H, QIAO B, SHEN X F 等. High-flux high-energy ion beam production from stable collisionless shock acceleration by intense petawatt-picosecond laser pulses[J]. New Journal of Physics, 2019, 21(3): 033035.
- 【3】 NAKAMURA T, BULANOV S V., ESIRKEPOV T Z 等. High-energy ions from near-critical density plasmas via magnetic vortex acceleration[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(13): 135002.

基金项目: 挑战计划(TZ2018005), NSAF 联合基金重点项目(U1630246, No.U1730449), 国家自然科学基金(11575298, 11575011, 91230205, 11575031, 11175026), 国家基础研究 973 计划(2013CBA01500, 2013CB834100), 国家高技术 863 计划, 国家青年千人计划

冲击波在低密度气体中引起的自生场研究

田超¹、杜报²、单连强¹、谷渝秋¹

1. 激光聚变研究中心, 绵阳 621900

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

Email: yqgu@caep.cn

摘要: 在激光驱动惯性约束聚变 (ICF) 内爆过程中, 当冲击波在低密度燃料气体中汇聚时, 由于气体处于温度高、密度低的状态, 离子-离子碰撞平均自由程较大, 甚至可达到与靶丸几何尺寸相当的程度。此时, 等离子体的动理学效应将显现出来, 采用传统的辐射流体力学程序将难以对等离子体的行为进行准确描述。强冲击穿过物质界面在气体中传输时, 由于冲击波前沿巨大的密度和温度梯度, 不同粒子间的质量和电荷态差异将驱动电荷分离, 进而产生自生电场。由于该电场随着等离子体密度和压强自发演化, 诊断该电场将有助于理解动理学区域中的冲击波结构及其演化, 进而理解动理学效应与辐射流体力学之间的偏离。本研究基于神光 II 升级装置, 探索了间接驱动 CH 材料产生的强冲击在低密度气体中引起的自生场分布及其演化, 利用 RCF 成功获得了不同时刻的自生场分布。主要结果如下: 1. 结合不同延时的数据, 得到了冲击波前沿自生场的传播速度, 并与辐射流体力学程序模拟结果进行了对比; 2. 对自生电场的空间分布进行了反演, 得到了电场空间分布情况, 峰值强度约为 10^7 V/m 量级, 与 Omega 激光装置直接驱动得到的结果类似; 3. 从实验结果发现了纳秒束大能量打靶会对质子靶产生影响, 从而降低质子束能量和产额, 导致成像结果不佳, 为下一步实验改进指明了方向。

关键词: 强冲击, 自生场, 质子照相

参考文献

- 【1】 Shan L. Q., Cai H. B., Zhang W. S., et al. Experimental Evidence of Kinetic Effects in Indirect-Drive Inertial Confinement Fusion Hohlraums. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 120(19): 195001.
- 【2】 Kagan G. and Tang X.-Z. Thermo-diffusion in inertially confined plasmas. *Phys. Lett. A*, 2014, 378(21): 1531-1535.
- 【3】 Sio H., Hua R., Ping Y., et al. A broadband proton backlighting platform to probe shock propagation in low-density systems. *Rev. Sci. Instrum.* 2017, 88(1): 013503.

鱼和熊掌兼得的软 X 射线能谱仪

曹磊峰

中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体科学与技术国防科技重点实验室

一般意义上来说，科学仪器设备的测量范围和分辨率是一对不可调和的矛盾。当追求大量程的时候，人们通常不得不容忍相对较低的分辨率；反之，当追求高分辨率的时候，人们通常将不得不局限于非常有限的量程。本项研究中，作者提出了一种新的软 X 射线能谱仪，在能够有效覆盖软 X 射线全部能区的同时，在测量范围全域具有高的能量分辨。新的仪器设备为惯性约束核聚变激光等离子体诊断，X 射线天文学带来了前所未有的技术机遇。

西华师范大学小型超短激光实验平台建设和激光核天体 初步研究进展

兰小飞、何阳帆、王晓南

西华师范大学物理与空间科学学院，南充 637002

Email: lan-x-f@163.com

摘要：基于超强超短激光的高能量密度物理相关研究一直是当前物理学的研究前沿。本文里将介绍基于西华师范大学现有条件下建设的小型化的 10TW（35fs，350mJ，对比度好于 10^9 ）激光系统的建设情况。以及基于该系统开展相关工作的一些设想。特别是开展一些基于激光团簇作用测量核天体反应 S 因子的研究工作。

天体核反应的 S 因子测量对于天文研究中的元素核合成、恒星演化具有极其重要的意义。因为电子屏蔽效应和非等离子体环境影响，常规的通过加速器测量到的核反应 S 因子与实际的天体环境中的 S 因子存在差异。而 $2\text{H}(\text{d},\text{n})3\text{He}$ 和 $3\text{He}(\text{d},\text{p})4\text{He}$ 反应是宇宙中最重要的核反应之一，研究它们，可以解释原初的核合成、大爆炸初期的元素丰度、以及恒星内部能源的来源等关键天文学问题。

课题组团队拟利用超短激光装置与 D^2 和 ^3He 的混合气体形成的团簇作用，模拟出类似的天体等离子体环境，直接测量这两个反应的 S 因子。通过探索研究，建立一套通用的激光团簇作用核天体反应 S 因子的测量方法，并对恒星早期演化进行深入的分析研究。特别是通过改变测量方法来避免等离子体环境本底 X 射线噪声对粒子温度测量的误差影响核反应 S 因子测量准确性。

关键词：超强超短激光 激光团簇相互作用 天体核反应 S 因子

参考文献

- 【1】 Barbui M, Bang W, Bonasera A, et al. Physical Review Letters, 2013, 11(8):082502..
- 【2】 Lattuada D, Barbarino M, Bonasera A, et al. Physical Review C, 2016, 93(4):045808.

超强超短激光驱动等离子体波导的高效离子加速

邹德滨*, 余同普, 银燕, 卓红斌, 邵福球¹

¹ 国防科技大学文理学院物理系, 长沙 410073

*Email: debinzou@126.com

摘要: 超强超短激光与等离子体的能量耦合对其驱动高效的粒子加速及其辐射至关重要, 微结构靶是目前大幅提升激光能量转换效率的最有效方法之一。通过理论模型和粒子模拟, 我们提出利用等离子体波导大幅增强离子加速的方法。研究发现, 当一束超强超短激光在等离子体波导中传输时, 将会在内部激发高阶模强纵向电场, 从波导壁上拉出的高密度电子串在该电场作用下得到充分加速。这些电子输运到附着靶后时, 在靶背诱导超强的鞘层电场, 进行高效的离子加速。相比于普通的平板靶结构, 离子的截止能量和能量转换效率提升近一个量级。在强度为 $1.75 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$ 、脉冲宽度为 26.7 fs、能量为 0.85 J 的激光条件下, 可以获得截止能量达到 46 MeV 的质子束和 150 MeV 的碳离子束, 激光至质子和碳离子束的能量转换效率高达 15%。

关键词: 超强超短激光、等离子体波导、模拟转换、粒子加速参考文献:

1. D. B. Zou et al., Efficient generation of ~ 100 MeV ions from ultrashort $\sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$ laser pulse interaction with a waveguide target, *Nucl. Fusion* 59, 066034 (2019);
2. D. Y. Yu, D. B. Zou et al., Generation of relativistic high-order-mode laser pulse from plasma waveguide, *New J. Phys* 21, 083003 (2019);
3. D. B. Zou et al., Laser driven ion acceleration from plasma micro-channel targets, *Sci. Rep* 7, 42666 (2017).

致谢: 国家自然科学基金项目 (Nos. 11705280, 11774430, 11622547) 等。

混合驱动点火技术路线中若干关键物理问题的实验研究进展

晏骥¹, 李纪伟², 理玉龙¹, 张兴¹, 车兴森¹, 郝亮², 贺贤土²

1 激光聚变研究中心, 四川绵阳

2 北京应用物理与计算数学研究所, 北京

混合驱动是由我国贺贤土院士针对美国点火攻关战役中传统间接驱动中心点火技术路线存在的不稳定性增长严重等问题独立提出的新惯性约束聚变点火技术路线。相比较于间接驱动中心点火, 混合驱动技术路线独有的非阻滞点火概念能够显著抑制流体力学不稳定性, 驱动对称性等非一维因素的影响, 使得内爆性能接近一维设计, 是一种更加皮实可靠的点火技术路线。

对于混合驱动技术路线而言, 存在三类完全区别于目前国际上主流点火技术路线的关键分解物理问题, 分别为: 1) 辐射-激光混合烧蚀增压特性; 2) 超声速电子热匀滑过程; 3) 辐射背景下高功率直接驱动 LPI 特指。项目团队在贺贤土院士带领下, 从 2014 年开始, 基于神光系列激光装置, 针对以上三类问题开展了大量分解实验研究。结果表明, 1) 在混合驱动条件下, 能够产生高达 150Mbar 的驱动压力, 为同等辐射温度下间接驱动烧蚀压力的 3.6 倍; 2) 半定量的表征了超声速电子热匀滑效果, 表明在数百微米尺度亚冕区等离子体范围内, 冲击波波阵面平整性好于 1%; 3) 对于功率密度达到 $5 \sim 2 \times 10^{15} \text{W/cm}^2$ 的高功率直接驱动束, 在辐射背景下其 LPI 要弱于纯直接驱动。

Influence of ionization on the formation of plasma channel and transport of relativistic electron beam in hydrocarbon gas

Jian-Min Tian¹, Hong-bo Cai² and Shao-Ping Zhu²

¹ Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

² Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China

Email: tianjianmin17@gscaep.ac.cn

Abstract

The influence of ionization on the formation of plasma channel and the propagation of a relativistic electron beam in a near-critical density hydrocarbon gas are investigated by using two-dimensional (2D) particle-in-cell (PIC) simulations. A magnetic-dipole vortex is formed and self-sustained by its magnetic field pressure inside the plasma channel when the short pulse laser energy is almost depleted. After its formation, the magnetic dipole vortex moves forward with the relativistic electron beam in the plasma channel. In a fully ionized plasma, a high density plasma barrier is usually formed ahead of the plasma channel due to the density profile steepening. Therefore, the deflection of the plasma channel can easily occur during the forward movement of the magnetic dipole vortex. In contrast, the deflection of the plasma channel is suppressed by the ionization effect with hydrocarbon gas. Two main mechanisms to suppress the deflection are found. These mechanisms are the decrease of the plasma density steepening at the front of the plasma channel in a partly-ionized plasma, and the consuming of the electromagnetic field energy due to the ionization itself.

Keywords: ionization effect, laser pulse, relativistic electron beam, magnetic dipole vortex.

Acknowledgments: This work was supported by Science Challenge Project (Grant No. TZ2016005), NSAF (No. U1730449), the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 11575030 and 11605269), the National Key Programme for S&T Research and Development in China (Grant No. 2016YFA0401100).

噪声频域特征对烧蚀径迹测量的影响分析和评估

陈伯伦，陈忠靖，王鹏，董云松，黄天暄

中物院激光聚变研究中心，绵阳 621900

Email: blchen@mail.ustc.edu.cn

摘要：高能量密度物理研究中，采用背光阴影成像技术，能够获得材料烧蚀过程飞行轨迹以及冲击波轨迹，并通过对阴影图像透过率的反演，给出烧蚀材料不同时刻的密度分布，能够用于材料物态特性、状态方程的研究。在惯性约束聚变研究中，对靶丸压缩过程径迹图像的测量，能够反演给出壳层飞行速度和剩余质量等重要物理信息，对压缩过程以及内爆效率的优化以及流体力学不稳定性的抑制具有重要意义。

实验测量结果反演的精度与图像噪声密切相关。通常采用的快时间响应记录设备，阴极的均匀性以及复杂的电子学聚焦系统产生的具有一定频谱特征的噪声相比图像记录设备像素级的白噪声对数据反演精度的影响更显著。项目团队通过仿真模拟，分析了不同频域特性噪声对密度分布反演精度的影响。并利用对实验结果一维和二维傅里叶分析结果，模拟产生具有相同频域特性的随机噪声，对实验结果精度进行了评估。

关键词：烧蚀径迹，密度分布，噪声频谱

控制固体等离子体表面高次谐波的发散角

刘峰^{1,2}、高健^{1,2}、李博原^{1,2}、陈自宇³、陈民^{1,2}、葛绪雷^{1,2}、远晓辉^{1,2}、陈黎明^{1,2,4}、盛政明^{1,2}、张杰^{1,2}

¹上海交通大学物理与天文学院, 上海, 200240

²上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海, 200240

³中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳, 621999

⁴中国科学院物理研究所, 北京, 100191

Email: liuf001@sjtu.edu.cn

摘要: 超短超强激光与固体靶表面等离子体相互作用可以通过高次谐波的方式产生从极紫外到软 X 射线波段的相干辐射, 是脉冲宽度为飞秒甚至阿秒量级的超短脉冲, 可以用于观测原子或分子中的电子运动等超快动力学过程; 也可以用于相干衍射成像等, 具有纳米级的空间分辨能力。

理论结果表明, 高次谐波有更短的脉宽和波长, 被聚焦后的强度能远超入射激光, 有望用于 QED 等离子体的实验研究。然而在高次谐波产生过程中, 相对论性强激光的光压会压缩靶面, 形成凹陷结构, 因此产生的高次谐波的波前会发生弯曲, 导致其可聚焦性降低。我们在上海交通大学激光等离子体教育部重点实验室的 200 TW 飞秒激光系统上开展了固体靶表面的高次谐波产生的实验研究, 使用一束预脉冲在靶表面产生凸起的预等离子体结构, 控制高次谐波的发散角。实验结果表明当驱动激光强度较低时, 靶表面结构可以增大高次谐波的发散角。同时数值模拟进一步表明当驱动激光强度较高时, 靶表面结构可以补偿激光光压的影响, 从而可以控制高次谐波的波前和发散角。

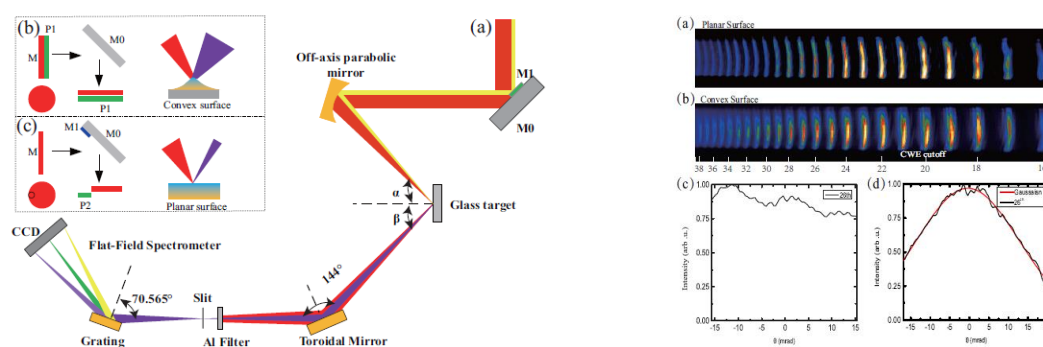


图 1 实验装置图与高次谐波光谱及发散角测量

关键词: 固体靶 高次谐波 发散角 激光等离子体

基于飞行等离子体镜的非线性康普顿散射研究

张智猛、张博、邓志刚、洪伟、周维民、谷渝秋

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900

Email: zmzhang_zju@sina.com.cn

摘要:

随着高功率激光技术的飞速发展, 超强激光功率密度 ($\geq 10^{21} \text{Wcm}^{-2}$) 有望未来几年在几个在建的激光装置上达到, 例如欧洲的 ELI 和 HiPER 装置。在该激光功率密度条件下, 激光与物质相互作用将进入到强场量子电动力学 (QED) 的全新领域。在该领域, 电子与激光直接相互作用的量子辐射可以产生超高转换效率的强伽玛光源, 引起了广泛的研究兴趣。

以前的相关研究工作主要考虑单束超强激光与固体靶相互作用来产生稠密的伽玛光源。但是, 由于固体靶作用过程中缺乏有效的电子加速及电子与激光对撞机制, 产生的伽玛光源品质 (如光子能量、转换效率和发散角) 受到了很大限制。为了解决该问题, 我们提出了一种基于飞行等离子体镜的新物理方案来产生高转换效率、高准直的强 QED 伽玛光源。如图 1 所示, 一束强激光用于驱动超薄靶产生飞行等离子体镜, 另一束相向传播的强激光与飞行等离子体镜对撞, 其产生的空间电荷分离场可以有效的加速出高能电子, 该高能电子与激光对撞发生非线性康普顿散射, 从而产生强伽玛辐射源。利用三维的 QED 粒子模拟程序验证了该机制的有效性。模拟表明, 在 $5 \times 10^{22} \text{Wcm}^{-2}$ 激光功率密度条件下, 可以产生 5fs、270nc 的超短脉宽的高光子密度伽玛源。伽玛光子截止能量可达 300MeV, 发散角约 15 度, 光源亮度达到 $\sim 10^{24} \text{photons/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\text{BW}$, 激光能量到伽玛光的转换效率可达 10%。因此, 这是一种有望在未来的极强光场条件下高效产生伽玛光源的新物理方案。

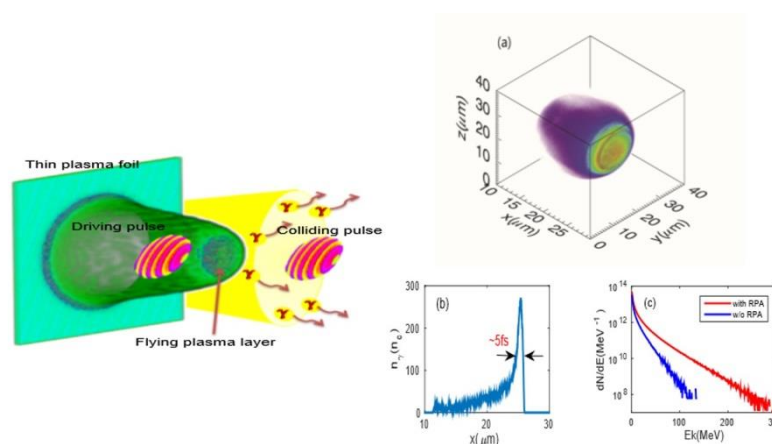


图 1 对撞物理方案及产生的伽玛光子束品质

关键词: 极强光场 非线性康普顿散射 伽玛光源

基金项目: 国家科技部重点研发项目 (NO.2018YFA0404804) 等

电子在激光场中振荡产生的 Betatron 辐射研究

李毅飞¹、冯杰¹、黄开¹、李大章²、谭军豪¹、王进光¹、陈黎明^{1*}

1 中国科学院物理研究所，北京 100190

2 中国科学院高能物理研究所，北京，100049

Email: yflx@iphy.ac.cn

摘要： 激光驱动的电子回旋辐射（Betatron）辐射由于其超短的脉宽、极小的源尺寸、高的峰值亮度以及在泵浦-探测实验中飞秒量级的时间同步性等特性，具有广泛的应用前景，例如相衬成像、超快 X 射线吸收谱学等；可以作为大型同步辐射光源的有效补充。但受被加速电子的注入和加速过程、电荷量等因素的影响， Betatron 辐射源在光子通量和能量、偏振度、稳定性以及可控性等方面仍需改善。

我们采用电离注入的方式提高了 Betatron 辐射的稳定性，通过激发电子与激光脉冲的高效共振，增强了辐射光子的通量、能量，并实现对辐射参数的调控。首次利用离子化注入的注入时间短、激光和电子高效共振的特点，提升了硬 X 射线辐射的效率，在实验中产生了临界能量 $E_c=75\text{keV}$ 、光子产额 8×10^8 超强的硬 X 射线源[1]；在此基础上，模拟中利用 15TW 圆偏振激光脉冲产生了圆偏振度接近 1 的 Betatron 软 X 射线源[2]；利用双激光脉冲，一束驱动尾波场加速，另一种振荡电子，极大地提高 Betatron 辐射的光子能量，产生了高亮的超硬 X/γ 射线源，并可实现对辐射光子能量的调控[3]；首次在实验中利用 PW 激光与近临界密度气体靶作用，极大地提高了 Betatron 辐射的转换效率，单发产额高达 $4\times 10^{12}/\text{Sr}$ ，比通常百 TW 飞秒激光驱动的高了数个数量级 [4]。这些研究工作促进了激光驱动的 Betatron 辐射源的发展和应用。

关键词： Betatron 辐射、X 射线、γ 射线、电离注入、激光尾场加速

参考文献

- 【1】K. Huang, Y. F. Li, et. al, Resonantly Enhanced Betatron Hard X-rays from Ionization Injected Electrons in a Laser Plasma Accelerator, Sci. Rep. 2018, 6, 27633
- 【2】Jie Feng, et.al., Ultra-fast circularly polarized X-ray from ionization injected electrons in laser plasma wakefield, Optics Express (Replying to Referees)
- 【3】J. Feng, Yifei Li, et. al, “Gamma ray emission from wakefield accelerated electrons wiggling in laser field”, Sci. Rep. 2019, 9,2531.
- 【4】Y. F. Li, et. al, Efficient synchrotron x-ray radiation generation in near-critical density plasmas with petawatt laser pulses, Opt. Express (under peer-review)

基金项目：国家自然科学基金项目(11334013, U1530150, 11721404, 11805266)、国家重点研发项目(2017YFA0403301)、科学挑战计划(TZ2018005)等

拍瓦超强激光与微米阵列靶作用产生超亮 γ 光和高密正电子源

武少栋、罗文

南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001

Email address: 1715979772@qq.com

摘要: 随着激光技术的快速发展, 超强超短激光的峰值光强高达 10^{22} W/cm^2 。超强超短激光与等离子体作用产生高密正电子源是高能密度物理研究的研究课题。相对论超强激光驱动的正电子源由于其短脉冲、高能量及高密度等特性, 在实验室天体物理、加速器物理及材料科学研究领域具有广阔的应用前景。

本文提出利用 10 PW 激光与微米阵列靶作用产生超亮 γ 光源和高密正电子源。当激光脉冲整体接触到多维的微米阵列时, 靶电子瞬间获得显著加速并向外辐射大量的高能 γ 光子。这些高能 γ 光子与反射的激光场相互作用, 通过多光子湮灭 (即 Breit-Wheeler 过程) 产生高能量密度正负电子对。由于激光能在微米结构中顺利穿行, 保证了相对论电子的能量转换效率, 从而有效提高了激光能量转化为伽马光子和正电子的效率。通过三维 QED-PIC 模拟计算, 该方案产生的 γ 光子产额为 8×10^{13} , 对应的峰值密度比激光临界密度高出 3 个数量级, 并具有一定的阿秒脉冲结构 ($\sim 400 \text{ as}$); 产生的正电子产额为 4×10^{10} , 截止能量为 1.5 GeV, 以及峰值密度约为 $10n_c$ 。当阵列靶长度和间距分别为 15 和 $2.5 \mu\text{m}$ 时, γ 光子和正电子的能量转化效率最佳, 其值分别为 15% 和 0.15%。相关研究结果表明, PW 激光与微米结构靶作用有望成为紧凑型高能粒子源研究的理想方案。

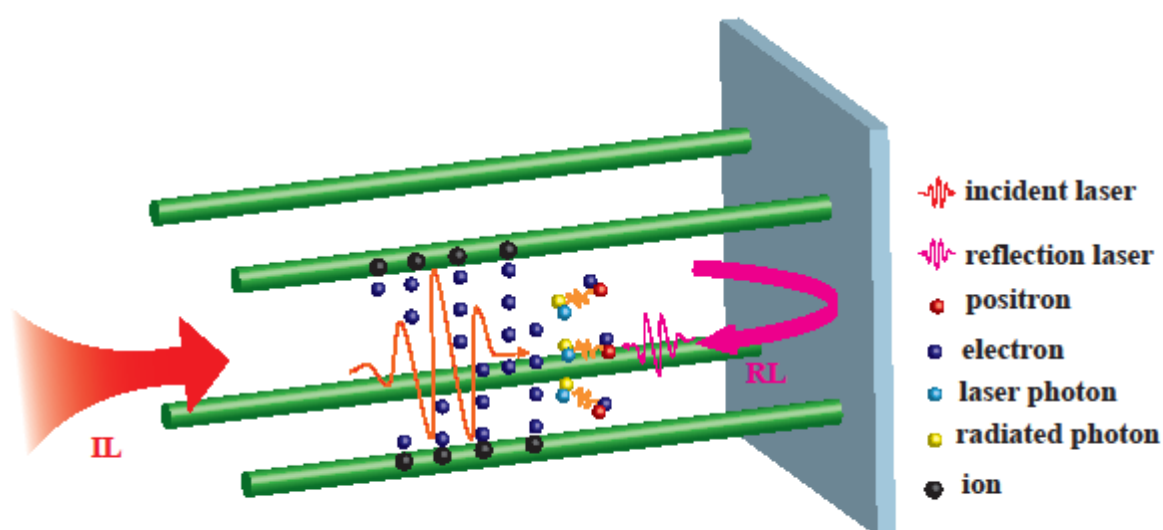


图 1 拍瓦超强激光与微米阵列靶相互作用示意图

关键词：拍瓦超强激光；微米阵列靶；高能伽玛光；高密正电子源

参考文献

- 【1】 Xu T, Shen B, Xu J, et al. Ultrashort megaelectronvolt positron beam generation based on laser-accelerated electrons[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23(3): 033109.
- 【2】 Jiang S , Ji L L , Audesirk H , et al. Microengineering Laser Plasma Interactions at Relativistic Intensities[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(8):085002.
- 【3】 Ridgers C P, Brady C S, Ducloux R, et al. Dense electron-positron plasmas and ultraintense γ rays from laser-irradiated solids[J]. Physical review letters, 2012, 108(16): 165006.
- 【4】 Pike O J, Mackenroth F, Hill E G, et al. A photon–photon collider in a vacuum hohlraum[J]. Nature Photonics, 2014, 8(6): 434.
- 【5】 Luo W, Zhu Y B, Zhuo H B, et al. Dense electron-positron plasmas and gamma-ray bursts generation by counter-propagating quantum electrodynamics-strong laser interaction with solid targets[J]. Physics of Plasmas, 2015, 22(6): 063112.
- 【6】 Chang H X, Qiao B, Xu Z, et al. Generation of overdense and high-energy electron-positron-pair plasmas by irradiation of a thin foil with two ultraintense lasers[J]. Physical Review E, 2015, 92(5): 053107.
- 【7】 Luo W, Wu S D, Liu W Y, et al. Enhanced electron-positron pair production by two obliquely incident lasers interacting with a solid target[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2018, 60(9): 095006.
- 【8】 Wen L , Wei-Yuan L , Tao Y , et al. QED cascade saturation in extreme high fields[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):8400-.
- 【9】 Zhu X L, Yu T P, Sheng Z M, et al. Dense GeV electron–positron pairs generated by lasers in near-critical-density plasmas[J]. Nature communications, 2016, 7: 13686.
- 【10】 Li H Z, Yu T P, Liu J J, et al. Ultra-bright γ -ray emission and dense positron production from two laser-driven colliding foils[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 17312.

Burst behavior due to quasimode excited by stimulated Brillouin scattering in strong coupling regime

Q. S. Feng¹, L. H. Cao¹, Z. J. Liu¹, C. Y. Zheng¹, and X. T. He^{1,2}

¹ Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, China

² Center for Applied Physics and Technology, Peking University, Beijing, China

e-mail (speaker): qingsong_feng@foxmail.com

摘要: The strong-coupling mode, called quasimode, will be excited by stimulated Brillouin scattering (SBS) in high-intensity laser-plasma interaction. And SBS of quasimode will compete with SBS of fast mode (or slow mode) in multi-ion species plasmas, thus leading to a low-frequency burst behavior of SBS reflectivity. The competition of quasimode and ion-acoustic wave (IAW) is an important saturation mechanism of SBS in high-intensity laser-plasma interaction. These results give a clear explanation to the low-frequency periodic burst behavior of SBS and should be considered as a saturation mechanism of SBS in high-intensity laser-plasma interaction.

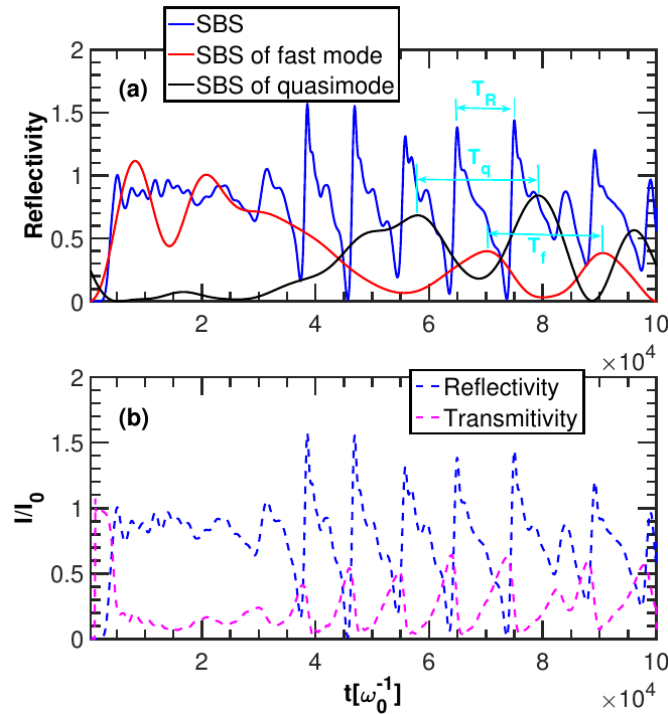


Figure 1 (a) The SBS reflectivities of different modes evolve with time. (b) The reflectivity and the transmittivity of the total SBS.

关键词: Stimulated Brillouin scattering; quasimode; ion-acoustic waves; inertial confinement fusion

参考文献

- 【1】 Q. S. Feng, L. H. Cao, Z. J. Liu, C. Y. Zheng and X. T. He, Burst behavior due to quasimode excited by stimulated Brillouin scattering in strong coupling regime, High Power Laser Science and Engineering, submitted.
- 【2】 Q. S. Feng .et al. Stimulated Brillouin scattering behaviors in multi-ion species plasmas in high-temperature and high-density region. Physics of Plasmas 26, 052101 (2019).

基金项目: “博士后创新人才支持计划” (No. BX20180055), 博士后面基金 (2018M641274), 国家自然科学基金项目 (NO. 11875091, 11575035, 11475030, 11875093 and 11435011), 973 项目 (No. 2013CB834101), 科学挑战计划 (No. TZ2016005)。

神光II升级装置高产额激光中子源实验研究

崔波、邓志刚、王为武、张智猛、滕建、戴曾海、洪伟、贺书凯、张博、齐伟、黄华、曹磊峰、周维民、谷渝秋

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900

Email: cuijiali326@126.com

摘要: 超强激光 ($>10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$) 与物质相互作用, 可以在极短的时间尺度 (皮秒量级) 和极小的空间尺度 (微米量级), 将带电离子加速到每核子几十兆电子伏的水平^[1], 成为一种获得短脉冲高能离子束新的加速方式。而加速产生的离子束 (氦离子束或者质子束) 通过束靶相互作用与转换体发生核反应, 可以获得高强度的超短脉冲中子源。与传统中子源相比, 基于超短超强激光的新型中子源由于其脉冲短 (几十~几百皮秒) 的特性, 具有亮度高 (脉冲强度 $>10^{18}/\text{cm}^2/\text{s}$)^[2] 和时间分辨极佳的优势; 而且短脉冲激光中子源紧凑性好^[3], 且具有一定的方向性和较好的空间分辨特性^[4, 5], 是实现超快中子探测的理想中子源, 在探索物质的微观结构、材料军控检查^[6]、核数据的精确测量、快中子照相^[7]和中子共振测温等方面具有重要的应用前景。

目前激光中子源实验获得的中子产额与实际应用需求还有一定的距离。如何提升中子产额是短脉冲激光中子源研究的热点问题。由于氦离子与 D、T、 ^7Li 、 ^9Be 等核素产生中子的截面较大, 因此利用短脉冲激光与含氦薄膜靶作用再与轻核反应是获得高中子产额的有效方式。在国内大能量皮秒激光装置上开展基于靶背鞘场加速机制 (TNSA) 的离子加速, 此时激光与含氦薄膜靶作用大部分能量被质子带走, 氦离子的数量比质子少两个量级。为了充分利用加速产生的质子和氦离子, 本研究团队使用 LiD 中子转换体, 与常用的 LiF 转换体相比, 该转换体多了 p-D 和 d-D 两个反应道, 能有效提高离子与转换体作用产生中子的概率。使用铜质圆筒 (1mm 厚度) 和 CD 薄膜 (2 μm 厚度) 封装 LiD 靶, 防止 LiD 潮解的同时穿过转换体的质子将大部分能量沉积在铜壁上, 能量高于 4 MeV 的质子会与 Cu 发生 $^{63}\text{Cu}(\text{p}, \text{n})^{63}\text{Zn}$ 反应, 与只含 Li 转换体比较, 产生数量较多的低能中子 ($E_n < 5\text{MeV}$)。如图 1 所示, 使用合适的复合材料中子转换体 (LiD+Cu) 可以有效的提升中子产额, 获得最高中子产额 $5.2 \times 10^8/\text{sr}$ 。

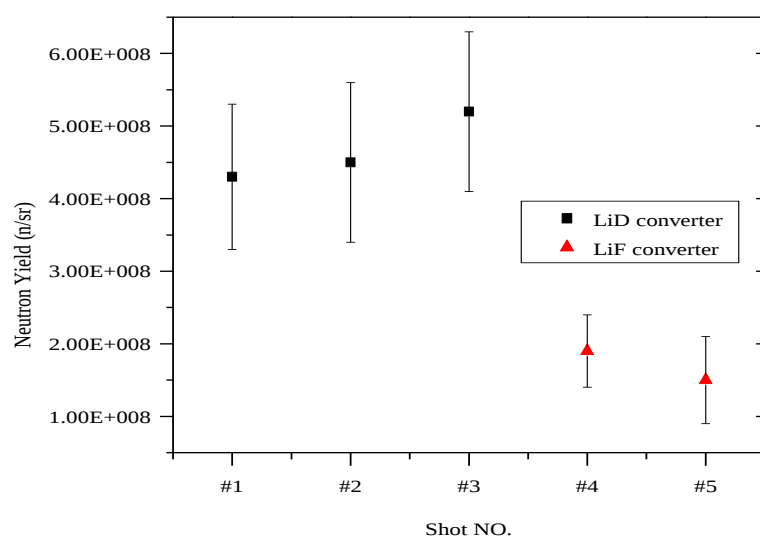


图 1 使用 LiD+Cu 的复合中子转换体与 LiF 转换体获得的中子产额对比

关键词：激光中子源 中子产额 中子转换体

- [1] R.A. Snavely, M.H. Key, S.P. Hatchett et al, *Intense High-Energy Proton Beams from Petawatt-Laser Irradiation of Solids*. PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2000, **85**(14): 2945.
- [2] I. Pomerantz, E. McCary, A.R. Meadows et al, *Ultrashort Pulsed Neutron Source*. PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2014, **113**(184801.
- [3] *Physics: A tabletop neutron source*. Nature, 2013, **494**(9435): 9.
- [4] M. Roth, D. Jung, K. Falk et al, *Bright Laser-Driven Neutron Source Based on the Relativistic Transparency of Solids*. PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2013, **110**(4): 044802.
- [5] D. Jung, K. Falk, N. Guler et al, *Characterization of a novel, short pulse laser-driven neutron source*. Physics of Plasmas, 2013, **20**(056706.
- [6] A. Favalli, F. Aymond, J.S. Bridgewater et al, "Nuclear Material Detection by One-Short-Pulse-Laser-Driven Neutron Source", (Seattle, USA, 2015).
- [7] N. Guler, P. Volegov, A. Favalli et al, *Neutron imaging with the short-pulse laser driven neutron source at the Trident laser facility*. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 2016, **120**(154901.

基金项目：科学挑战计划领域五方向四——激光核物理（TZ2018005）

拍瓦强激光在固体细丝靶面驱动的电子振荡及高亮度高能伽玛辐射

王伟民^{1, 2}、盛政明³、陈黎明²、李玉同²、张杰^{2, 3}¹中国人民大学物理系, 北京 100872²中国科学院物理研究所, 北京 100190³上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240Email: weiminwang1@ruc.edu.cn; hbwwm1@iphy.ac.cn

摘要: 近期国内外强激光研究机构成功建造了数拍瓦超强激光装置 (1 拍瓦= 10^{15} 瓦), 并同时进一步计划建造更强的百拍瓦量级激光装置。这些装置输出的激光脉冲的聚焦强度能够达到 10^{25} W/cm² (激光电场强度达 10^{16} V/m), 这会将强激光与物质相互作用从相对论和经典非线性物理推进到量子电动力学 (QED) 占主导的范畴。为了在该领域开展研究, 我们首先在 KLAPS 粒子模拟 (PIC) 程序【1】的基础上开发了 QED-PIC 程序【2, 3】。

最近, 我们利用该程序对强激光脉冲与横向尺度在激光波长量级的固体细丝相互作用进行了研究, 发现即使驱动激光在拍瓦量级, 就能产生显著的 QED 效应【4】。当强激光与细丝靶作用时, 一方面在细丝靶表面把电子加速至 GeV 量级, 另一方面在靶表面激发出了很强的准静态横向电磁场, 后者在丝表面驱动高能电子做横向振荡, 并产生类同步辐射。固体细丝靶的高密度使得激光脉冲沿靶表面引导和加速电子, 产生数目非常高的准直 GeV 电子束, 其单脉冲电量可以达到 10nC 量级, 而气体靶尾场加速器的电量仅在 100pC 量级。同时固体细丝靶的高密度使得激光在靶表面形成的准静态横向电磁场非常强, 可以达到 10^{14} V/m 量级, 在电子静止坐标系下, 该有效振荡场接近 Schwinger 临界场强 $E_{Sh}=1.32 \times 10^{18}$ V/m (此场强可以在真空中直接激发出正负电子对), 在此条件下电子振荡引起的同步辐射已经进入了 QED 领域, 因而能够非常高效地产生准直性良好的高能量、高亮度伽玛射线。三维 QED-PIC 模拟表明, 伽玛射线的亮度仅次于大型 X 射线自由电子激光装置 (XFEL), 但其光子能量高达到几十 MeV 到几百 MeV (比 XFEL 高 3 个数量级), 从激光到伽玛射线的转换效率可以接近 10%。与通常的强激光与固体靶作用产生高能伽玛射线相比, 本方案不仅大大降低了对驱动激光功率的要求, 而且大幅提高伽玛射线的准直性、大幅降低其横向尺寸, 因此伽玛射线的亮度得到极大提升。这种高能伽玛射线在放射治疗、原子核光学、实验室天体物理、伽玛光子对撞机等具有诱人的应用前景。

关键词: 强激光与物质相互作用; 高能伽玛辐射; 粒子模拟

资助项目: 国家重点研发 (2018YFA0404801); 国家自然科学基金 (11775302, 11721091, 11520101003)

参考文献

- 【1】W.-M. Wang, P. Gibbon, Z.-M. Sheng, and Y.-T. Li, Integrated simulation approach for laser-driven fast ignition, Phys. Rev. E 91, 013101 (2015).
- 【2】W.-M. Wang, Z.-M. Sheng, P. Gibbon, and Y.-T. Li, Modeling of photon and pair production due to quantum electrodynamics effects in particle-in-cell simulation (arXiv:1608.06356).
- 【3】W.-M. Wang, P. Gibbon, Z.-M. Sheng, Y.-T. Li, and J. Zhang, Laser opacity in underdense preplasma of solid targets due to quantum electrodynamics effects, Phys. Rev. E 96, 013201 (2017).
- 【4】W.-M. Wang, Z.-M. Sheng, P. Gibbon, L.-M. Chen, Y.-T. Li, and J. Zhang, Collimated ultrabright gamma rays from electron wiggling along a petawatt laser-irradiated wire in the QED regime, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 115, 9911 (2018).

基于局部整体点火设计的双壳靶内爆实验研究

郭亮¹, 李璐璐², 李琦¹, 李三伟¹, 杨家敏, 江少恩¹, 赵英奎², 丁永坤²

¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900

² 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100080

Email: lianguo_job@163.com

摘要: 激光间接驱动的局部整体点火, 使用多壳层结构的大尺寸靶丸来吸收和传递能量, 可能实现低收缩比、高增益的惯性约束聚变。我们在十万焦耳激光装置上, 采用具有背光的靶设计, 研究了外层为 CH 内层为 Al 的双壳靶的内爆动力学和出中子情况。实验获得在约 200eV 的驱动温度下, 双壳靶外壳内爆速度约为 100km/s, 靶丸最大收缩比约为 8, 最高中子产额为 4×10^8 , 一维 YOC 约 4.5%。实验测量的靶丸在激光驱动结束到中子发射最大时刻间较长时间内的壳层运动与理论预测基本一致, 表明该双壳靶的复杂结构及其半腔接缝等缺陷对壳层流体运动的影响有限。

关键词: 惯性约束聚变, 局部整体点火, 内爆, 双壳靶

Quantum statistical approach for ionization potential depression in dense plasmas

林成亮¹、侯永²、袁建民^{1, 2}

1. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100193

2. 国防科技大学文理学院物理系, 长沙 410073

Email: cllin@gscaep.ac.cn

The properties of an atomic system immersed in dense plasmas are strongly modified by the interactive plasma environment. For instance, the emission spectrum originating from bound-bound and bound-free transitions is shifted and broadened due to collisions between the emitter system and the plasma particles. These modifications are known as pressure broadening and shift of spectral lines for bound-bound transitions and ionization potential depression for bound-free transitions. We focus on the phenomenon of ionization potential depression in dense plasmas.

Theoretical modelling of ionization potential depression and the related ionization equilibrium in dense plasmas, in particular in warm/hot dense matter, represents a significant challenge due to ionic coupling and electronic degeneracy effects. Based on dynamical structure factor, a quantum statistical model for ionization potential depression in multi-ionic plasmas, where quantum exchange and dynamical correlation effects in plasma environments are consistently and systematically taken into account in terms of the concept of self-energy within the framework of Green's function technique. Calculations for values of ionization potential depression for different chemical elements are performed with the electronic and ionic structure factors. The ionic structure factors are determined by solving the Ornstein-Zernike equation in combination with the hypernetted-chain closure relation. As a further application of our approach, we present results for the charge state distribution of aluminum plasmas at several temperatures and densities through solving the coupled Saha equations.

【1】 C. Lin, W.-D. Kraeft, G. Roepke, and H. Reinholz, Ionization-potential depression and dynamical structure factor in dense plasmas, *Phys. Rev. E* 96, 013202 (2017).

【2】 C. Lin, Ionization potential depression and ionization balance in dense plasmas, arXiv: 1904.04456v1 (2019).

温稠密铝和硅的 X 射线吸收光谱实验研究

赵阳

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900

Email: edwardszy@yahoo.com

摘要: 温稠密物质是惯性约束聚变、Z-箍缩和地球物理研究中物质发展和存在的重要阶段, 是目前高能量密度物理领域中最为复杂、最具挑战性的研究对象之一。温稠密物质的微观原子结构既不同于有序的固体, 也不同于高温稀薄等离子体, 具有多体强耦合、强非线性和多时空尺度等复杂特征, 给理论描述带来了巨大的挑战。实验上借助大科学装置开展极端条件下的温稠密物质辐射特性研究既可以检验复杂原子结构的理论建模, 又为状态方程等应用研究提供了诊断依据, 具有重要的基础研究意义和应用价值。

本项目研究的铝是高压状态方程研究的标准材料, 硅是 ICF 靶丸的预热阻挡材料以及地球内部硅酸盐物质的重要组成元素。基于强激光加载的动态冲击压缩是产生最极端条件温稠密物质的实验室研究手段, 本项目利用神光系列激光装置, 建立了辐射驱动冲击波对撞压缩的温稠密物质产生技术, 并利用短脉冲点背光方式实现了时间分辨的 X 吸收光谱实验测量。在神光 II 以及神光 II 升级激光装置上, 获得了从 2 倍到近 4 倍固体密度的温稠密 Al 吸收边演化过程 (国际最高为 3 倍压缩), 由吸收边展宽得到的电子温度演化与流体模拟基本一致, 吸收边移动实验结果与改进的理论模型符合较好[1, 2]。这说明了在目前的压缩状态下, 相比于国外的理论模型, 改进的理论模型对于原子结构的描述是正确的[3]。在 Si 的近边吸收光谱研究方面, 成功观测到了在冲击对撞下近边结构的消失以及斜率的改变, 并与流体状态进行了关联, 为发展相变以及离子温度诊断方法奠定了基础。

项目组基于大型激光装置发展了有效的温稠密物质 X 射线吸收光谱实验研究技术, 丰富了极端参数区间温稠密物质原子结构及光谱特性的实验研究手段, 对极端条件下原子理论模拟的发展和状态方程应用研究具有推动作用。

关键词: 温稠密物质 X 射线吸收光谱

参考文献

- 【1】 Y. Zhao *et al*, Euro. Phys. Lett., 2017, 117, 65001.
- 【2】 赵阳, 中国科学院重大科技基础设施成果汇编 2015. 2016, 92-93.
- 【3】 S. Zhang *et al*, Phys. Rev. B. 2016, 93, 115114.

基金项目: 国防基础科研核科学挑战专题 (TZ2018005, TZ2016001), 国家自然科学基金 (11774321, 11734013), 中国工程物理研究院创新基金 (CX2019023) 和激光聚变研究中心人才基金。

惯性约束聚变中无碰撞冲击波对等离子状态和激光能量沉积的影响

燕鑫鑫、蔡洪波、朱少平

北京大学

摘要：

等离子体状态分析是间接驱动惯性约束聚变黑腔物理中的一个热点问题，实验中常通过测量 Thompson 散射谱诊断。黑腔腔壁的金等离子体与充气气体（氦或戊烷）之间的相互扩散与混合会导致无碰撞冲击波（CLS）等动理学现象的产生，这使得实验中测量的 Thomson 散射谱无法与流体理论预测结果相符合。同时由于混合显现的产生，对于黑腔中的激光等离子相互作用（LPI）过程也会产生一定的影响。激光能量沉积一直是黑腔物理中特别关注的焦点，因此，对于黑腔中 CLS 产生及影响的研究是必要的。本次报告针对神光装置上开展的惯性约束聚变 LPI 实验中的光谱异常问题，利用辐射流体模拟给出了黑腔等离子体状态，通过 PIC 模拟确认了 CLS 的形成机理及其影响。分析了单流体建模难以处理的高 Z-低 Z 界面处的反常混合，发现是 LPI 实验中背反光谱异常的原因，这对惯性约束聚变中黑腔等离子体状态分布和激光等离子体相互作用研究有一定的借鉴意义。

关键词：惯性约束聚变，无碰撞冲击波

黑腔中心靶丸处辐射流测量实验研究

谢旭飞¹、侯立飞¹、刘慎业¹、任宽¹、杜华冰¹、彭晓世¹、刘永刚¹、李志超¹、李琦¹、尚万里¹、车兴森¹、霍文义²、蓝可²、李三伟¹、郭亮¹、蒋小华¹、杨冬¹、王峰¹、何海恩¹、杨家敏¹、江少恩¹、丁永坤²

1 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900

2 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

Email: xie_xufei@163.com

摘要: 间接驱动激光惯性约束聚变中, 靶丸处辐射流强度是影响靶丸烧蚀、压缩内爆的关键物理量。受限于靶丸处辐射流强度表征的复杂性, 长期以来主要通过黑腔腔壁辐射流测量数据修正数值模拟程序, 进而间接评估靶丸处辐射流强度。然而, 极端状态下黑腔腔壁辐射流测量容易受到黑腔激光注入孔缩孔、腔壁金泡膨胀等因素干扰, 很难用于精确表征靶丸处辐射流强度。本研究采用黑腔中心样品再发射流与被动式冲击波图样测量两种技术, 开展靶丸处驱动辐射流强度时间演化实验研究。采用精密针孔与平响应 XRD 探测器相结合研制的局域辐射流测量系统, 获得了充气柱腔中心球型样品再发射流时间演化数据, 通过与二维辐射流体模拟程序 LARED 计算结果相比, 验证了测量结果的可靠性; 采用被动式冲击波图样测量方法开展了黑腔中心靶丸处峰值辐射温度测量实验, 通过被动式冲击波测量系统 (PSBO) 获得了黑腔中心台阶型样品的冲击波图样, 进而给出了黑腔中心处峰值辐射温度, 利用三维视因子程序 IRAD3D 对黑腔中心样品处辐射温度进行了评估, 获得的理论分析结果与实验结果基本一致。此外, 拟将黑腔中心样品再发射流与被动式冲击波图样测量技术相结合, 通过再发射流时间演化数据及冲击波速度确定的峰值驱动辐射流强度, 评估黑腔中心靶丸处驱动辐射流强度时间演化。该方法可适用于不同构型黑腔腔型, 可为极端条件下不同类型黑腔内部靶丸处辐射流评估提供重要诊断手段。

关键词: 靶丸处辐射流, 样品再发射流, 冲击波图样, 辐射温度, 充气黑腔

资助项目: 国家自然科学基金青年项目 (NO.11505168)

大焦深 X 射线涡旋场产生技术研究

臧华平、梁二军

郑州大学物理学院, 郑州 450002

Email: zanghuaping@sina.com

摘要: 光学涡旋是一类在位相奇点处具有螺旋型波前位相的特殊电磁场结构[1], X 射线涡旋由于可以将显微、光谱学等应用拓展到原子或纳米尺度而引起物理学家广泛关注。短波长涡旋不仅可以极大程度上降低衍射极限, 提高成像分辨率, 而且可以产生飞秒(10⁻¹⁵s), 甚至于阿秒(10⁻¹⁸s)尺度的超短脉冲, 实时探测电子和原子核运动规律。替代平面波与物质相互作用, 有望提供更加精确和丰富的光电离和吸收过程; 与强场高次谐波结合应用可发现新的物理现象, 在高分辨泵浦探测实验、内壳层电离汤姆孙散射产生高能涡旋光子等高能密度物理研究中具有不可替代的作用。

为了克服 X 射线涡旋场受焦深较短的应用限制, 课题组开展了大量软 X 射线涡旋场研究。设计了具有不同模态特征的大焦深 X 射线涡旋光束, 并对其轴向嬗变规律和涡旋位相进行了理论和实验验证, 建立了高精度数值模拟计算程序和涡旋位相检测手段。与传统设计方案相比, 课题组提出的大焦深 X 射线涡旋场技术具有成本低、分辨率高、设计灵活等优点, 在光刻、X 射线天文学、显微镜、微电力系统等研究领域具有广泛应用前景, 有望推动激光技术、阿秒科学及高能密度物理等前沿基础科学研究。

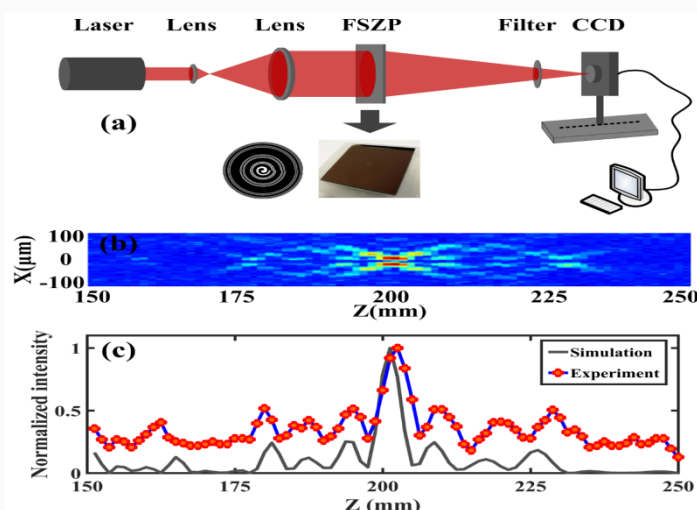


图 1 多焦点涡旋光束模态特征的实验表征

关键词: 涡旋场 X 射线

【1】Paterson L, *et al.*, Controlled rotation of optically trapped microscopic particles, *Science*, 2001, 292(5518): 912-914.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO.11404290)

量子自由电子激光：研究现状及前景

范全平、曹磊峰*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心，等离子体物理重点实验室，四川绵阳 621900

Email: leifeng.cao@caep.cn

摘要：量子自由电子激光（Q-FELs）为实现高校实验室规模的高增益 X 射线装置提供了良好的机遇。Q-FEL 装置具有前所未有的窄带宽，并同时具有横向和纵向相干性。得益于将激光场作为光波荡器使用，Q-FEL 装置可以做得非常紧凑。比如，为了产生相干 X 射线脉冲，所需的波荡周期降低到亚微米水平，所需的电子束能量降低到数十 MeV 水平。目前世界上已有科研团队开展相关研究。本研究团队自两年前开始开展 Q-FEL 相关研究工作。这里，我们简要介绍一下 Q-FEL 的发展现状以及面临的主要实验挑战，并简要介绍一下本研究团队在 Q-FEL 方面已开展的主要工作，以及取得的主要进展和成果。我们希望更多的科研团队能够加入到 Q-FEL 研究中，进一步促进 Q-FEL 的发展。

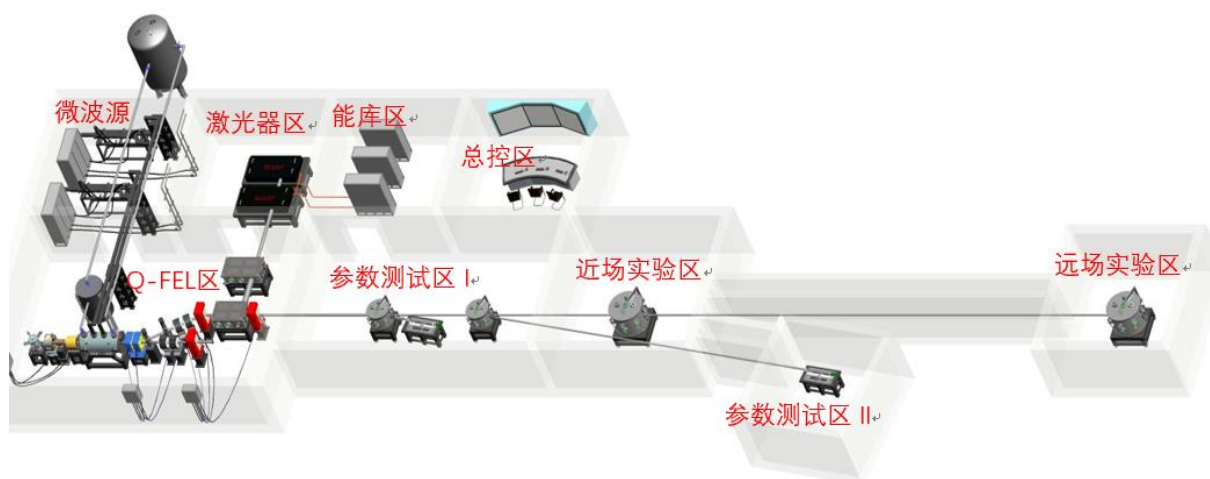


图 1 Q-FEL 装置整机概念设计

关键词：X 射线自由电子激光，光波荡器

资助项目：等离子体重点实验室自主科研项目（ZY2018-01）

利用预等离子体密度截断增强高次谐波产生研究

李博原、高健、刘峰、陈民

上海交通大学物理与天文学院激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240

Email: liby1990@sjtu.edu.cn

摘要: 超短脉冲激光与固体靶相互作用产生的高次谐波是一种高亮度的相干极紫外辐射, 由于这种高次谐波源具有高度的时间和空间相干性, 可以产生阿秒脉冲并获得近衍射极限性能, 在阿秒超快过程诊断和相干衍射成像等方面具有潜在的应用。然而, 激光固体高次谐波产生长期以来面临着两个主要问题。首先, 固体高次谐波产生效率强烈依赖于预等离子体密度标长, 存在一个最佳的预等离子体标长, 使得高次谐波产生效率最佳; 其次, 近衍射极限的束特性只能通过无预等离子体的靶获得, 在产生效率最佳的预等离子体标长下, 高次谐波发散角将被显著地增大。以上两方面矛盾极大地限制了高次谐波的应用。

我们提出利用预等离子体密度截断可以使激光直接与高密度靶作用, 从而获得高效率、窄带宽和小发散角的极紫外高次谐波辐射, 同时极大地降低辐射效率对预等离子体标长的敏感性。我们通过数值模拟结果发现: (1) 合适的预等离子体密度截断可以使高次谐波产生效率提高超过一个量级; (2) 采用预等离子体密度截断后, 高次谐波可以稳定地获得近衍射极限性能; (3) 采用预等离子体密度截断后, 高次谐波产生效率变得对预等离子体标长不敏感。这些特性可以极大地提高激光固体靶高次谐波在实验上的可行性和稳定性。为此, 我们同时提出了一种可以在实验上有效产生预等离子体密度截断的方法。

关键词: 超短脉冲激光 固体靶 预等离子体 密度截断 高次谐波

参考文献

- 【1】 B. Dromey *et al.*, Diffraction-limited performance and focusing of high harmonics from relativistic plasmas, *Nat. Phys.* 2009, 5 (2), 146-152.
- 【2】 S. Kahaly *et al.*, Direct Observation of Density-Gradient Effects in Harmonic Generation from Plasma Mirrors, *Phys. Rev. Lett.* 2013, 110(17), 175001.
- 【3】 H. Vincenti *et al.*, Optical properties of relativistic plasma mirrors, *Nat. Commun.* 2014, 5, 3403.
- 【4】 J. Gao *et al.*, Influence of laser contrast on high-order harmonic generation from solid-density plasma surfaces, *Chin. Opt. Lett.* 2017, 15(8), 081902.

基金项目: 国家自然科学基金项目 NO.11905129

中国博士后基金面上资助 2017M621443

国家自然科学基金项目 No.11774227

Enhanced ion acceleration in the ultra-intense laser driven magnetized collisionless shocks

Wen-shuai Zhang^{1,2}, Hong-bo Cai^{1,3,4,5}, Liu-lei Wei², Jian-min Tian² and Shao-ping Zhu^{1,2,5}

¹ Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100094, People's Republic of China

² Graduate School, China Academy of Engineering Physics, PO Box 2101, Beijing 100088, People's Republic of China

³ HEDPS, Center for Applied Physics and Technology, Peking University, Beijing, 100871, People's Republic of China

⁴ IFSA Collaborative Innovation Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, People's Republic of China

⁵ Authors to whom any correspondence should be addressed.

E-mail: cai_hongbo@iapcm.ac.cn and zsp@iapcm.ac.cn

Abstract: The effect of an externally applied magnetic field on the ion acceleration by laser-driven collisionless shocks is examined by means of multi-dimensional particle-in-cell simulations. For the interaction of ultra-intense sub-picosecond laser pulses with the near-relativistic critical-density plasma, the longitudinal transport of the laser generated fast electrons are significantly inhibited by the kilo-Tesla (kT) level transverse magnetic field, resulting in a thermal pressure which significantly exceeds the laser radiation pressure in the hot electron accumulation region. As a result, the accumulated plasma expands into the vacuum and leads to acceleration of asupersonic plasma flow in the opposite direction through the rocket effect, which streams into the target and drives asupercritical magnetized collisionless shock. In comparison with the case without the external magnetic field, where an electrostatic collisionless shock can be driven, the energy flux of the shock accelerated quasimonoenergetic ion beam is considerably increased by an order of magnitude due to the strength enhancement of the magnetized shock.

Keywords: laser-driven ion sources, collisionless shock acceleration, magnetized collisionless shocks

基金项目: This work was supported by the Science Challenge Project (Grant No. TZ2016005), the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 11575030 and No. U1730449 (NSAF)) and the National Key Programme for S&T Research and Development in China (Grant No. 2016YFA0401100). The PIC simulations were performed on the Tianhe-2 supercomputer (China).

相对论激光脉冲驱动微纳结构靶产生高次谐波的理论研究

王少义、谭放、陈勇、杨祖华、吴玉迟、魏来、栗敬钦、曹磊峰、周维民

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621000

Email: cslr1113@163.com

摘要: 超短超强激光技术的飞速发展给人们研究光与物质相互作用提供了有力工具, 新物理新现象陆续被发现, 比如电离、解离、高次谐波、粒子加速等, 其中高次谐波是突破飞秒极限实现阿秒脉冲光源的首选方案。利用激光驱动惰性气体产生高次谐波获得阿秒 X 射线辐射源的方案最早被提出, 同时也是最广泛地被理论和实验研究。但是此方案中为了使气体不发生过度电离影响谐波产生, 入射激光强度不能太高($<10^{16} \text{W/cm}^2$), 导致获得的高次谐波强度很弱。固体靶由于其高密度可以承受更大的电荷分离场, 使得大量电子可以在激光场下振荡达到更高的能量密度和电流密度, 从而能够产生比气体靶更高阶以及更强的高次谐波, 利用相对论激光驱动固体靶产生高次谐波的研究成为目前研究的热点。

课题组团队系统的研究了相对论激光脉冲驱动微纳结构固体靶产生高次谐波的频谱特性。由于高次谐波的频谱强烈依赖于光栅靶的周期结构, 采用非整数周期光栅靶, 发现相对论激光脉冲驱动下在靶表面方向可以获得非整数次数的高次谐波谱, 如图 1 所示。通过改变光栅的占空比, 有效的调控高次谐波的峰谷比。另外, 采用特殊结构波带片靶, 可以获得窄带高次谐波谱。这对丰富高次谐波频谱以及材料光电能谱探测方面具有潜在应用。

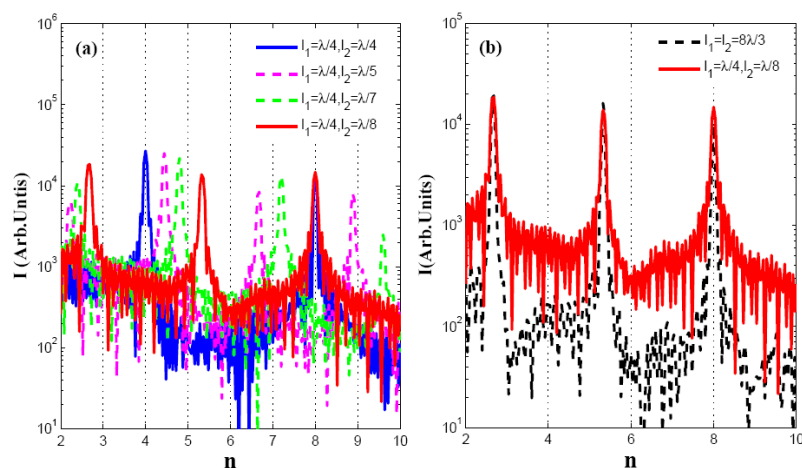


图 1 利用 2 维 PIC 模拟获得不同微纳结构的高次谐波谱

关键词: 光栅靶、波带片靶、高次谐波

激光驱动超热电子束输运效率表征及优化研究

杨月¹, 李博原^{2,3}, 闫永宏¹, 齐伟¹, 吴玉迟^{1,2}, 单连强¹, 曹莉华^{2,4}, 赵宗清^{1,2}, 周维民^{1,2}, 曹磊峰^{1,2}, 谷渝秋^{1,2}

1. 等离子体物理重点实验室, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900;
2. IFSA 协同创新中心, 上海交通大学, 上海 200240; 3. 激光等离子体教育部重点实验室, 物理与天文学院, 上海交通大学, 上海 200240; 4. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

Email: yangy10_my@163.com

摘要:

超强激光和固体靶相互作用产生的超热电子束在惯性约束聚变、离子加速、微焦点 X 射线源、正负电子对产生等领域具有广阔应用前景。其中, 超热电子输运效率是决定能量沉积效率、辐射源品质的一个关键物理量。

为了准确测量和优化超热电子的输运效率, 我们考虑阻抗效应, 理论推导了超热电子输运模型, 获得了能量输运效率的参数关系, 据此给出了定量预测超热电子输运效率的方法。设计双示踪层法消除激光能量吸收效率和电子反射的影响、准确测量电子输运效率, 并开展实验得到了平面靶和微纳多孔阵列靶中超热电子的阻抗输运系数和射程, 和理论推导、蒙特卡洛模拟一致。结果表明, 对于 MeV 级的电子, 其射程大约在 100 μm 左右, 当电子输运距离等于阻抗射程时, 电子束能量降低为初始的 25%。超热电子在多孔阵列靶中的输运效率比平面靶中高两倍, 对毫米级厚靶可能达到 5 倍, 初步证实了微纳结构靶对超热电子输运效率的有效提高。

超热电子输运效率模型可便于定量比较不同靶型和激光条件对输运效率的影响, 为实际调控输运效率提供了指导。微纳结构靶中的有效电子输运对实现激光聚变点火、新型辐射源产生等实际应用具有重要意义。

关键词: 超热电子输运 电子输运效率 示踪层法 微纳结构靶

参考文献

- 【1】 J. C. ZHAO *et al.*, The model of the influence of the electron refluxing on the electron transport and K α emission, *Laser Part. Beams*, 2017, 35: 483.
- 【2】 Y. Yang *et al.*, Investigation on the transport efficiency of fast electrons with double-layer K α fluorescence measurement, *Phys. Plasmas*, 2019, accepted.

极端条件下的材料相变研究

刘浩、段晓溪、章欢、叶青、张琛、王哲斌、孙亮、杨为明、杨冬、杨家敏

中国工程物理研究院激光聚变研究中心，绵阳，621900

Email: liuhao-lfrc@caep.cn

激光加载技术通过极短时间（纳秒量级）内的能量强耦合，在物质内产生冲击波压缩物质，使物质处于高应变率（ $10^6 \text{ s}^{-1} \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$ ）、高温（ $10^2 \text{ K} \sim 10^6 \text{ K}$ ）、高压（Mbar~Gbar）的状态。冲击波加载过程中，材料结构必然经历显著的变化，以便克服晶格对剪切形变的阻力。当冲击加载压力高于材料相变临界压力时，相变开始发生，但与等温平衡态相变不一样的是冲击相变通常需要一定的压力和体积变化才能完成，这种行为是非平衡响应的典型标志。极端条件下的材料相变实验技术研究在过去几十年的时间里获得了长足的发展，建立了一些典型的实验应用。传统的材料相变实验方法包括高压声速测量、速度剖面诊断、X 射线吸收谱测量和 X 射线衍射诊断等。高压声速测量和速度剖面诊断属于宏观热力学参数诊断，可以用很高的精度获得材料相变时的热力学状态参数特征，仅能够解决相变热力学的问题。X 射线吸收谱测量包括吸收边、近边结构及扩展边结构等诊断方法，这种方法可以获得原位实时的材料电子结构，可以从微观角度研究材料相变，但实验结果的解析需要适当的电子-离子弛豫模型，并且像扩展边结构一类的技术与物相结构不存在严格的一一对应关系，很可能引起误解。X 射线衍射是测量材料物相结构最优方法，测量技术无复杂物理模型依赖，结果直接明了，自 1970 年代开始被用于动态冲击压缩实验中。与传统的 X 射线衍射技术相比，激光装置上的 X 射线衍射技术受限于信号弱、噪声强、加载源调控难等因素制约，应用受到了极大的限制。利用 10kJ 级激光实验装置，基于 Debye-Scherrer 衍射原理，发展了一套适用于强激光装置的动态 X 射线衍射技术，用于极端条件下材料相变研究，并建立了以 Fe 为代表的中 Z 材料和以 Ta 为代表的高 Z 材料的典型应用，获得了高品质的衍射数据。激光装置上动态 X 射线衍射诊断技术的建立将有助于解决传统实验技术难以实现的高精度材料微观原位物相诊断，同时将推动极端条件下材料相变研究深入发展。

关键词：相变 动态 X 射线衍射

SnTe 和 SnSe 的高压结构相变和物性演化

周丹

1. 长春理工大学理学院, 长春 130022

Email: zhoudan@cust.edu.cn

摘要：碲化锡（SnTe）和硒化锡（SnSe）是典型的半导体材料，在常温常压下具有异乎寻常的热学、力学和电子学特性，可以制作成为相变记忆、热电、超导和电池阳极材料等。因具有独特的层状结构，它们也是研究压力下二维材料向三维材料转变的理想模型。SnTe和SnSe的结构和物理性质与压力存在显著的关联效应。然而，其高压相的晶体结构和相变机制，以及压力对其物性的调控行为仍存在很多未知和异议。我们利用高压同步辐射实验结合第一性原理理论计算方法研究了SnTe和SnSe的高压结构、相变机制和电子性质随压力的变化行为[1-4]。结果显示，SnTe化合物在高压下存在多相动态共存现象，并预言这种现象可能广泛的存在于高压相变过程（尤其是相变边界附近）。而微观上硒化锡的多个中间相结构不仅可以共存和互相转化，其各组成相结构的存在比例也在演变，进而导致各宏观物理量也会表现出明显的变化行为。我们提出这是一种新的相变类型，并命名为“亚结构相变”。这与传统的结构相变不同，它是由多个能量相近的、相互转变能垒很小的结构动态共存，压力会导致不同结构的比例随之动态变化的新型相变。

关键词：结构预测，第一性原理，晶体结构，高压，氢键，超离子相

参考文献

- [1] Dan Zhou, Quan Li, Weitao Zheng, Yanming Ma and Changfeng Chen, "Structural metatransition of energetically tangled crystalline phases", Phys. Chem. Chem. Phys. 19, 4560 (2017).
- [2] Dan Zhou, Quan Li, Yanming Ma, Qiliang Cui, and Changfeng Chen, " Pressure-Induced Superconductivity in SnTe: A First-Principles Study", J. Phys. Chem. C, 117, 12266 (2013).
- [3] Dan Zhou, Quan Li, Yanming Ma, Qiliang Cui, and Changfeng Chen, "Pressure-Driven Enhancement of Topological Insulating State in Tin Telluride", J. Phys. Chem. C, 117, 8437 (2013).
- [4] Dan Zhou, Quan Li, Yanming Ma, Qiliang Cui, and Changfeng Chen, "Unraveling Convolved Structural Transitions in SnTe at High Pressure", J. Phys. Chem. C, 117, 5352 (2013).

基于 Halbach 二极磁铁的紧凑型汤姆逊离子谱仪研究

滕建、贺书凯、邓志刚、张博、洪伟、张智猛、朱斌、谷渝秋

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900

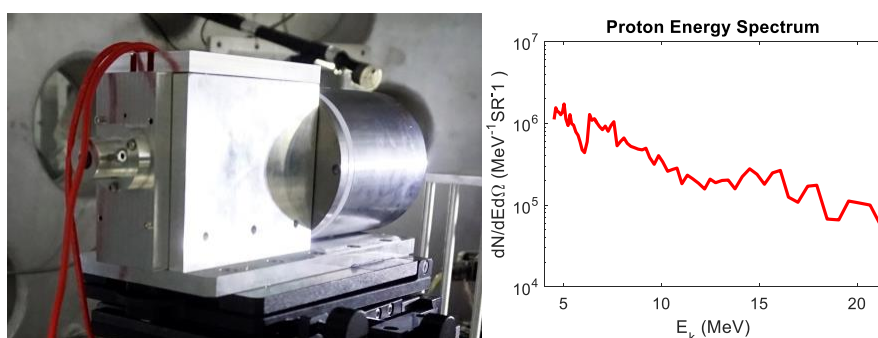
Email: tengjian@mail.ustc.edu.cn

摘要: 随着超短超强激光技术的发展, 激光离子加速研究得到了越来越多的关注, 并得到了广泛应用。特别是近些年来激光对比度的提高, 新的加速机制的深入研究, 实验上质子能量不断得到提升。基于高对比度激光的辐射压加速相对于传统的靶背鞘场加速 ($E_p \sim I^{0.5 \pm 0.1}$) 具有更高的加速效率 ($E_p \sim I$), 可以加速能量到更高能, 当前使用高对比度激光与超薄靶向和作用产生了最高能量达 93MeV 的质子。最近, 利用透明增强的混合加速机制加速质子能量达到 100MeV。

稳步提升的激光质子能量需要新的高分辨诊断技术来分辨离子种类和能量。汤姆逊谱仪是激光离子加速实验中最常用的能谱诊断设备。由于其可靠的静态电、磁场和相对的简洁性, 得到了广泛研究。为了区分高于 100MeV 的质子和其它离子, 传统的 C 型磁铁会特别大, 因此在一些靶室尺寸受限情况下很难安装。

最近, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心的数拍瓦 OPCPA 激光装置建成并投入使用, 其激光强度有望超过 10^{21} W/cm^2 , 其对比度有望好于 10^{10} 。这是激光离子加速研究一个很好的实验平台, 在不久的将来有望产生高于 100MeV 的质子。这个装置的靶室半径只有接近 0.5m, 因此需要一个较简洁的高分辨汤姆逊谱仪来分辨 100MeV 的质子。

为此课题组团队提出并研制了一台基于圆柱形 Halbach 二极磁铁的高分辨紧凑型汤姆逊谱仪。为了产生同样的磁场强度, Halbach 二极磁铁尺寸相对于传统的 C 型磁场更小, 通过结构优化设计, 在外径 100mm 的尺寸下, 实现了磁场强度达 1T, 整个谱仪长度小于 30cm, 该谱仪可以区分 100MeV 质子和其它离子。并且 100MeV 质子的能量分辨可以小于 5%。另外该圆柱形的谱仪设计还可以方便挂载与靶室法兰上。而传统的基于 C 型磁铁的汤姆逊谱仪很难挂载。这也是该谱仪的一个特点。目前该谱仪已经应用于数 PW 激光装置上, 获得了高分辨的离子能谱图像。



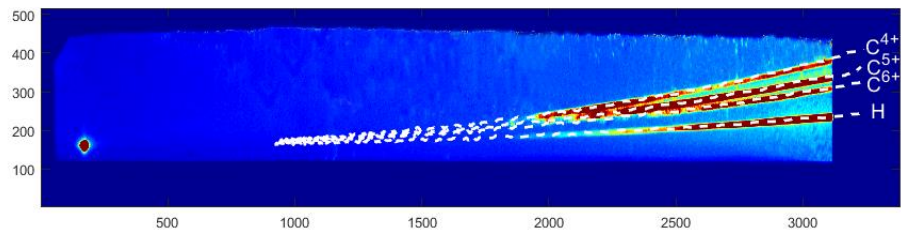


图 1 (a) 安装于靶室的汤姆逊谱仪 (b) IP 板记录的离子信号及模拟的图像. (c) 典型质子能谱

关键词: Halbach 二极磁铁 汤姆逊谱仪 激光离子加速

基金项目: 国家科技部重点研发项目 (NO.2016YFA0401100), 国家自然科学基金(11705177), 科学挑战计划(TZ2018005)

双色线偏振激光与固体靶相互作用产生高强度圆偏振阿秒脉冲

仲丛林¹, 乔宾^{1, 2, *}, 张玉雪¹, 李夏冰¹, 张铤¹, 周沧涛²,朱少平^{3, 4}, 贺贤土^{1, 3}

1、北京大学应用物理与技术研究中心, 北京, 100871

2、深圳技术大学先进材料测试技术研究中心, 深圳, 518118

3、应用物理与计算数学研究所, 北京, 100094

4、中国工程物理研究院研究生院, 北京, 100088

Email: bqiao@pku.edu.cn

摘要:

阿秒光源由于其极端的时间和空间尺度, 在原子、分子动力学过程中的高时空分辨探测研究等超快光学领域具有重要的研究意义。光源的偏振特性可以用来探测物质结构的非对称性, 例如物质手性、磁性结构等, 尤其是在 XUV 波段, 圆偏振阿秒脉冲可以探究与电子自旋角动量和轨道角动量耦合相关的物理过程, 拓扑绝缘体中的量子相位等问题。然而, 目前就如何利用现有激光技术获得一个高强度的圆偏振阿秒脉冲成为近年来的研究热点。

我们提出一种利用相对论双色线偏振激光与固体靶相互作用产生高强度圆偏振阿秒脉冲的新方法。不同于以往只能从驱动光中继承偏振特性的方案 (圆偏振或者椭圆偏振激光驱动), 我们的机制实现了从线偏振光到圆偏振阿秒辐射的转化, 并且所获得的阿秒脉冲的偏振特性可以通过调节双色线偏振驱动场中不同组分的强度比例, 激光入射角度和激光强度来实现。一维和二维的 PIC 模拟结果表明, 在驱动场的基频强度为 $1.5 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$ 和二倍频强度为 $6.4 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$, 滤波频带为 30th -46th 时可以获得强度为 $1.4 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 的圆偏振阿秒 XUV 脉冲, 脉冲宽度约 120as。

关键词: 圆偏振 阿秒 高强度 双色线偏振

参考文献

- 【1】 Z.-Y. Chen and A. Pukhov, Bright high-order harmonic generation with controllable polarization from a relativistic plasma mirror, *Nature communications* 2016, 7, 12515.
- 【2】 S. Tang and N. Kumar, Ultraintense attosecond pulse emission from relativistic laser-plasma interaction, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2019, 61, 2.

基金项目: 挑战计划 (TZ2018005), NSAF 联合基金重点项目 (U1630246, No.U1730449), 国家自然科学基金 (11575298, 11575011, 91230205, 11575031, 11175026), 国家基础研究 973 计划 (2013CBA01500, 2013CB834100), 国家高技术 863 计划, 国家青年千人计划等

黑腔辐射源特性一致性差异的原因分析

李琦¹, 李三伟¹, 郭亮¹, 李志超¹, 龚韬¹, 蒋小华¹, 杨冬¹, 杨家敏¹

¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900

激光驱动的高温黑腔辐射源是实现 ICF 的重要基础, 其在高压状态方程、天体物理等高能量密度物理研究领域也具有重要应用。精确测量黑腔辐射温度对评估黑腔内的靶丸内爆过程具有重要意义, 因此需要在实验中精密测量黑腔辐射温度。我们通常认为黑腔辐射源是一个理想的黑体辐射, 其具有较高辐射温度、均匀的强度分布和近似普朗克的能谱分布。实验中, 我们利用全能段平响应辐射流探测器 (FXRD) 测量黑腔注入孔泄露的辐射流强度, 然后利用黑体辐射的小孔泄露模型反推黑腔内的辐射温度。然而, 实际的激光束是有限的, 黑腔腔壁分为高发射的光斑区和低发射的非光斑区, 因此黑腔辐射源不是一个理想的黑体辐射。真实的激光总能量和束间能量平衡条件具有一定偏差, 这些偏差可能导致辐射温度的一致性差异。激光打靶位置精度会导致光斑区的位置变化, 从而影响视场中观测的辐射流强度, 因此激光位置精度也可能导致辐射温度的一致性差异。已有的实验结果表明, 在现有的激光总能量平衡和束间能量平衡条件下, 采用激光总能量归一化不会引入较大偏差。模拟结果表明, 激光位置精度会导致一致性偏差, 实验也证实了实际的激光光斑存在位置偏差。激光位置偏差是导致辐射温度一致性差异的主要原因。

高能量密度立方聚合氮 (cg-N) 的高压声子特性

唐琦琪、蒲梅芳、刘珊、张峰、冯雷豪、戚磊、张雷雷、雷力*

四川大学原子与分子物理研究所, 成都 610065

Email: lei@scu.edu.cn

摘要: 以 N-N 相结合的三维网状聚合氮 (cg-N) 是一种理想的高能量密度材料 (HEDM), 这种全氮化合物在众多领域具有十分广阔的应用前景。由于氮三键与氮单键间存在巨大的能量差, 聚合氮 (N-N) 在转变为分子氮 (N≡N) 过程中将释放出近 800kJ/mol 的能量。从分子氮出发, 不断加压经过氮的一系列“固体分子态-固体分子态”的转变后, 再经高温高压 (爆炸) 逆热力学过程, 截获亚稳态的聚合氮。在超高压 134 GPa 条件下, 不引入任何激光吸热材料, 直接对非晶态 η -N 进行双面金刚石压砧激光加热 (LHDAC), 使样品温度达到 2000K 以上, 成功合成出透明的 cg-N^[3,4]。在室温下测得 46-172GPa 范围内 cg-N 的拉曼声子随压力的变化关系, 首次获得 cg-N 的零压 Grüneisen 参数 (1.24 ± 0.02)^[4]。另外利用自主设计的高压低温装置研究 cg-N 在低温下 (173-300K) 的拉曼声子对温度的响应特性, 发现低温条件下 cg-N 的拉曼散射效应中起主导作用的为三声子耦合过程^[5]。

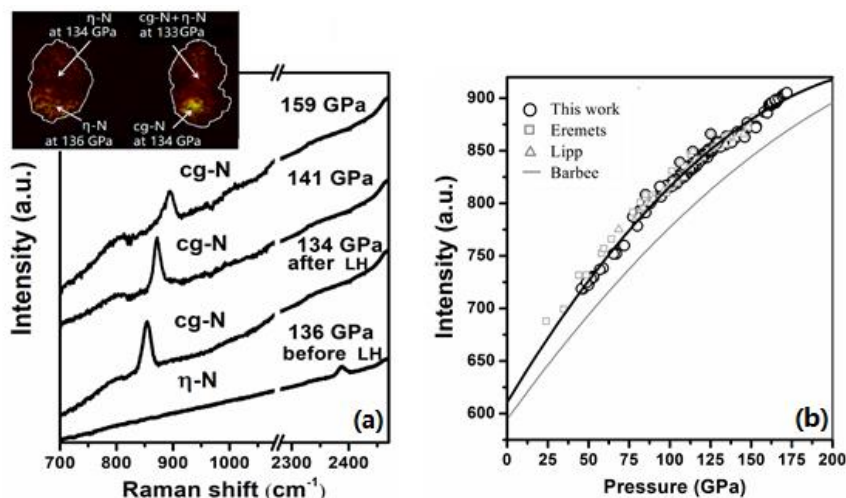


图 1 (a) 激光加热前后氮的拉曼光谱。(b) cg-N 的拉曼 A 模随压力变化关系。

关键词: 高能量密度材料 立方聚合氮 (cg-N) 高压高温 拉曼散射 激光加热金刚石压砧(LHDAC)

参考文献

- 【1】 M. I. Erements; et al, Single-bonded cubic form of nitrogen, *Nat. Mater.* 2004, 3, 558.
- 【2】 M. J. Lipp; et al, Transformation of molecular nitrogen to nonmolecular phases at megabar pressures by direct laser heating, *Phys. Rev. B.* 2007, 76, 014113.
- 【3】 雷力, 蒲梅芳, 冯雷豪, 戚磊, 张雷雷, 立方聚合氮 (cg-N)的高温高压合成, *高压物理学报*, 2018, 32(2), 020102.
- 【4】 Meifang Pu, Shan Liu, Li Lei, Feng Zhang, Leihao Feng, Lei Qi, Leilei Zhang, Raman study of pressure-induced dissociative transitions in nitrogen, *Solid State Commun.* 2019, 298, 113645.
- 【5】 刘珊, 蒲梅芳, 张峰, 雷力, 立方聚合氮(cg-N)的高压低温拉曼光谱研究, *光散射学报*, 2019.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (NO. 11774247)

双脉冲驱动近临界密度等离子体增强伽马射线辐射实验研究

熊俊，安红海，方智恒，王琛，王瑞荣，雷安乐，王伟

中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所

摘要：

为提升皮秒激光-伽马射线源的转换效率，我们采用双脉冲驱动方式，利用单路纳秒激光预烧蚀 CH 薄膜，经一定时间延时，让其自由膨胀，形成较大尺度的近临界密度等离子体。第二束皮秒激光直接与等离子体相互作用，通过 DLC 光场直接加速机制将快电子加速到相对论水平，形成较高集中度的电子束流，再经转换靶得到具有一定方向性的伽马射线源，该辐射源的强度对比单脉冲直接驱动平面靶方式要强 3-4 倍。在未来，结合数值模拟和实验分析，对驱动激光参数及靶设计参数进行细致优化，有望将激光-伽马射线转换效率提升近一个量级，从而大幅降低超强激光驱动伽马辐射源的应用门槛，为高时、空分辨的瞬态透视照相技术开辟新的应用前景。

关键词：双脉冲，近临界密度等离子体，伽马射线

温稠密物质在太赫兹波段的电光特性研究

吴海忠， 涂艳云， 张栋文， 吕治辉

国防科技大学文理学院，长沙 410000

Email: 13787144517@163.com

摘要: 了解温稠密物质的结构和动力学过程是高能密度物理的关键挑战之一，而高能密度物理是惯性约束聚变、天体物理和强激光与物质相互作用的基础。温稠密物质的电光特性是研究其结构、辐射特性和机理的重要参数之一，它反映了离子、电子、背景辐射以及强外场之间强耦合、相关和非线性相互作用的复杂特性。

本文提出了一种利用透射式太赫兹时域光谱法测量温稠密物质电光特性的实验装置，利用铌酸锂倾斜波前产生强的太赫兹辐射，用于测量太赫兹波形的装置包含一个反射梯级和平衡探测器，平衡探测器使太赫兹光束和探测光束在时间和空间上实现重合，为了证明我们实验装置的实用性，我们测量了温稠密物质——金在太赫兹频率范围内的电光特性，我们建立了基于初始原理的理论模型和仿真方法，准确地预测了温稠密物质的结构和动力学过程。结合创新性的实验技术和基本理论方法，对太赫兹范围内电子和离子的结构及其输运特性进行了深入系统的研究。该模型准确地描述了温稠密物质的状态和动力学过程，为惯性约束聚变的详细模拟奠定了坚实的基础。

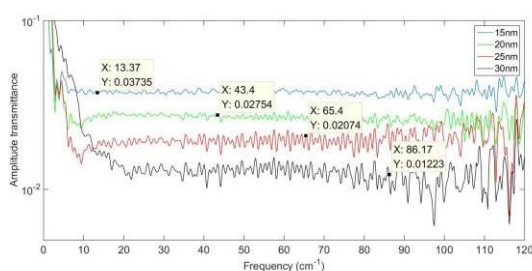


图1 不同厚度的金膜在太赫兹波段的电场透过率

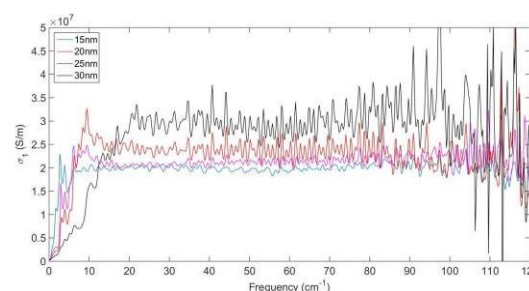


图2 不同厚度的金膜在太赫兹波段的电导率

关键词: 温稠密物质 太赫兹 电光特性

参考文献

- [1]. K. Widmann, T. Ao, M. E. Foord, D. F. Price, A. D. Ellis, P. T. Springer, and A. Ng, "Single-State Measurement of Electrical Conductivity of Warm Dense Gold", *Physical Review Letters*, Vol. 92, No. 12, 125002, 2004.
- [2]. B. K. Ofori-Okai, A. Descamps, J. Lu, L. E. Seipp, A. Weinmann, S. H. Glenzer, and Z. Chen, "Toward quasi-DC conductivity of warm dense matter measured by single-shot terahertz spectroscopy," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 89, 10D109, 2018.

强激光冲击加载下锡材料微喷动态过程可见光阴影成像研究

席涛, 朱斌, 辛建婷, 何卫华, 税敏, 储根柏, 赵永强

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

Email:2015xt@sina.com

摘要：当强冲击波从金属自由面或金属/气体界面发生卸载时，金属表面通常会发生微喷射现象，在短时间内产生高速、多尺寸喷射颗粒。冲击加载下材料微喷射研究是当前冲击压缩科学研究的前沿和热点问题，研究成果在武器物理、惯性约束聚变等研究领域具有重要应用。大量的实验和理论分析表明，冲击加载下材料微喷射机理复杂，其过程受表面缺陷、加载波形、加载压力、加载应变率等众多因素影响。但是从其主导机制上可以分为由冲击波和表面缺陷引起的微射流过程以及由衰减冲击波引起的微层裂过程。

本文介绍了基于神光III原型激光装置开展的强激光冲击加载下材料微喷动态过程的阴影成像工作，主要研究了三角波冲击加载下平面锡靶的微喷动态过程，发现锡材料自由面轮廓形态与加载状态息息相关，同时得到了微射流条件下样品自由面速度和射流速度的定量关系。此外，对于强激光冲击加载下锡柱腔靶构型的材料微喷过程进行了初步研究，得到了样品自由面轮廓图像，并对激光加载的均匀性进行了评估。

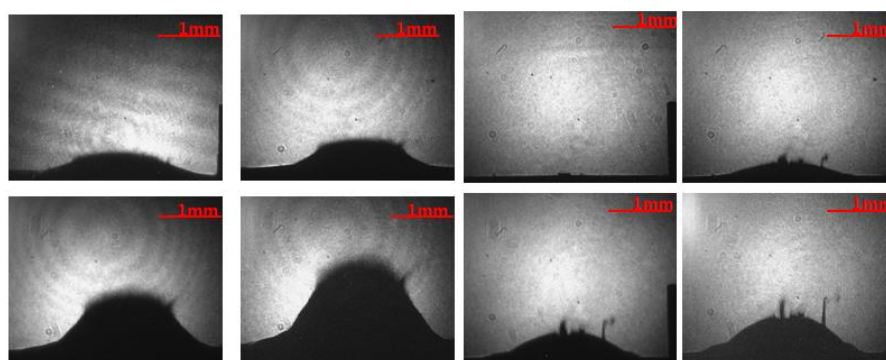


图 1 强激光冲击加载下锡材料微层裂和微射流阴影成像图

关键词：微喷射；可见光阴影成像；强激光；柱形靶

参考文献

- [1] An Min He, Pei Wang, Jian Li Shao. Molecular dynamics simulations of ejecta size distributions for shock-loaded Cu with a wedged surface groove. Computational Materials Science, 2015, 98 (15): 271-277.
- [2] T. de Rességuier. Spallation in laser shock-loaded tin below and just above melting on release. Journal of Applied Physics, 2007, 102, 073535.

密度梯度对相对论等离子体表面产生高次谐波的影响

高健^{1,2}, 刘峰^{1,2}, 李博原^{1,2}, 远晓辉^{1,2}, 陈氏^{1,2}, 盛政明^{1,2,3,4}, 张杰^{1,2}

1、上海交通大学, 上海 200240

2、IFSA 协同创新中心, 上海 200240

3、英国斯特拉斯克莱德大学, 英国格拉斯哥 G4 0NG

4、李政道研究所, 上海 200240

E-mail: jiangao24@sjtu.edu.cn

摘要: 获得持续时间更短, 能量密度更高的阿秒脉冲用于微观世界超快过程的控制与诊断, 一直是人们追求的目标。目前获得阿秒脉冲光源较为成熟的手段是从气体介质中产生高次谐波 (HHG)^[1]。与受限于驱动激光能量 ($<10^{15} \text{ W/cm}^2$) 的气体高次谐波相比, 固体密度等离子体表面激发的高次谐波不受驱动激光能量的限制, 可以产生能量更强的阿秒脉冲。目前, 固体密度等离子体表面产生高次谐波主要有两种机制, 即相干尾场辐射机制 (coherent wake emission, CWE)^[2] 和相对论振荡镜机制 (relativistically oscillating mirror, ROM)^[3,4]。

高次谐波产生过程不但依赖于激光强度, 并且等离子体密度分布对其也有很大影响^[5,6]。我们利用上海交通大学激光等离子体实验室的 200 TW 飞秒激光装置, 研究了等离子体密度标长对固体靶表面 ROM 机制高次谐波产生的影响。结合等离子体镜 (PM) 以及交叉偏振波系统, 激光主脉冲 10 ps 以前的对比度从 10^{-8} 被提高至 10^{-11} 。

实验中一束强度为 $1.9 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 的飞秒激光脉冲以 40° 入射到抛光的熔融石英玻璃靶表面, 在其反射方向用平场光谱仪测量其产生的高次谐波光谱。实验结果表明, ROM 机制的高次谐波强度随密度标长的增加, 先下降后上升最后再下降 (图 1(a))。二维 PIC 模拟结果表明, 有两个最佳密度标长对于可以有效产生 ROM 机制高次谐波 (图 1(b))。通过匹配激光势与电荷分离势 $\Gamma = 0$, 我们建立了一个理论分析模型。该模型可以很好地解释实验与模拟结果 (图 1(c))。

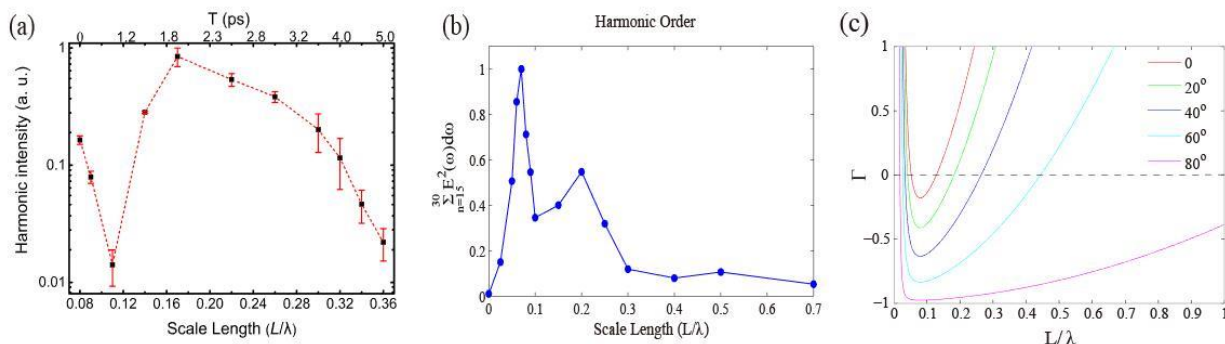


图 1 (a) 实验上, ROM 高次谐波强度随密度标长的变化。(b) 模拟上, ROM 高次谐波强度随密度标长的变化。(c) 通过匹配激光势与电荷分离势 $\Gamma = 0$, 有两个最佳密度标长。

参考文献

- [1] J. L. Krause, K. J. Schafer, and K. C. Kulander, Phys. Rev. Lett. **68**, 3535 (1992).
- [2] F. Quéré et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 125004 (2006).
- [3] S. V. Bulanov et al., Phys. Plasmas. **1**, 745 (1994).
- [4] T. Baeva et al., Phys. Rev. E. **74**, 046404 (2006).
- [5] S. Kahaly et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 175001 (2013).
- [6] A. Tarasevitch et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 103902 (2007).

温稠密金在太赫兹波段电导率初步实验结果

张栋文¹、吕治辉¹、王小伟¹、吴海忠¹、郭泉¹、赵增秀¹、袁建民^{1, 2}

国防科技大学文理学院物理系, 长沙 410073

中国工程物理研究院研究生院, 北京 100193

Email: dwzhang@nudt.edu.cn

摘要: 温稠密物质的结构和动力学问题, 是激光惯性约束聚变和天体演化的物理基础, 对高能量密度物理及相关国防高科技的发展具有重要意义。温稠密物质的电导率是研究温稠密物质结构、辐射性质和动力学的重要参数, 反映了离子、电子、背景辐射以及强驱动场之间的强耦合、强关联和非线性作用特征, 关系到能量转换过程, 影响极端条件下物质的物态物性。课题组针对温稠密等离子体理论建模和实验表征面临的挑战, 实验上发展单发的太赫兹时域光谱技术, 测量温稠密金等离子体在太赫兹波段时间分辨的电导率, 理论上发展基于第一原理的理论模型和数值计算方法, 研究其结构和太赫兹波段的电导率。我们将报告利用透射型单发太赫兹时域光谱技术测量数十纳米厚度的金薄膜在太赫兹波段静态电导率的实验结果, 以及激光加热的金等离子太赫兹电导率的初步实验结果。

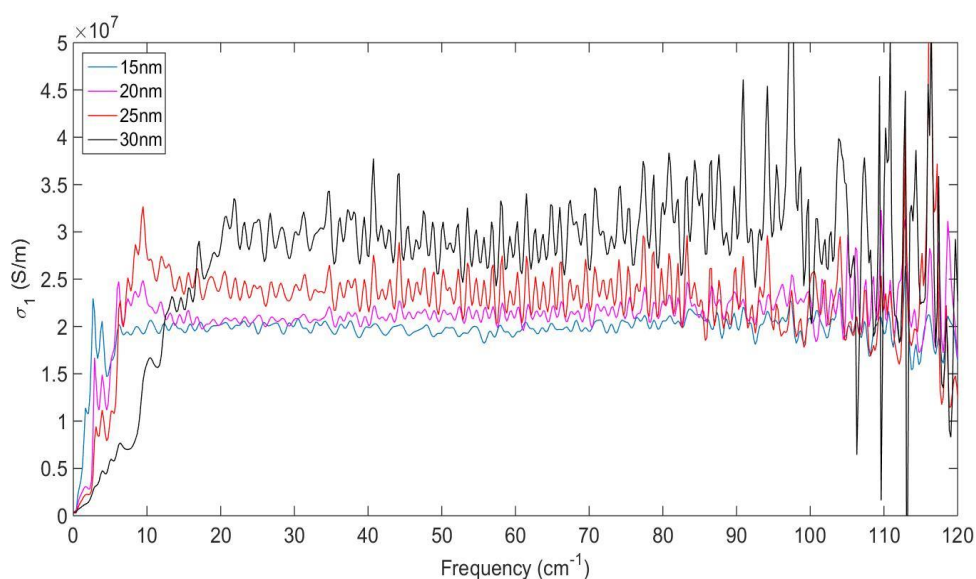


图1 不同厚度的金膜在太赫兹波段的电导率

关键词: 温稠密物质 电导率 太赫兹

参考文献

- 【1】 K.Widmann, T. Ao, M. E. Foord, D. F. Price, A. D. Ellis, P.T. Springer, and A. Ng, Single-State Measurement of Electrical Conductivity of Warm Dense Gold, Physical Review Letters 2004, 92, 125002.
- 【2】 B. K. Ofori-Okai, A. Descamps, J. Lu, L. E. Seipp, A. Weinmann, S. H. Glenzer, and Z. Chen, Toward quasi-DC conductivity of warm dense matter measured by single-shot terahertz spectroscopy, Review of Scientific Instruments 2018, 89, 10D109.

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 联合基金重点项目 (NO. U1830206)。

激光加载金属动态破碎过程 X 射线成像研究

储根柏、辛建婷、周维民

中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室，绵阳 621900

Email: cgbcc@sina.com

摘要：

材料在强冲击作用下，由于微缺陷、表面熔化与破碎等机制，会导致大量的颗粒物脱离表面向外喷射，颗粒物具有一定的速度、颗粒度分布特性。目前，基于爆轰、气炮加载实验获得的微喷量、速度分布等定量数据非常有限，时空演化过程还存在很多认识空白。激光加载实验具有加载压强灵活、诊断精度高等优势，能够为物理过程研究提供重要的实验数据和物理图像。

为获取高空间分辨、高信噪比的物理图像和颗粒密度分布信息，本项目首先利用 X 射线 KB 显微成像诊断金属微射流物理过程。KB 显微成像具有准单能、高空间分辨和集光效率高等多种优点，静态实验获得成像中心区域空间分辨高达 $7\mu\text{m}$ ，动态实验获得平面金属微射流形成过程中多个时刻的动态演化图像，清晰地展示微射流产生、发展的复杂过程，为微射流早期形成过程的物理认识和数值模拟提供了重要的物理图像和数据支撑。

为获取微喷全程密度分布信息，本项目发展建立了高能 X 射线对金属稀疏破碎过程进行诊断的物理实验方法，利用超短脉冲激光作用产生微焦点、高能 X 射线（能段范围 50-200keV）开展稀疏破碎过程的高精度密度诊断研究。实验获得锡材料在典型加载压强条件下稀疏破碎过程密度灰度诊断图像，加载过程一维平面性理想，诊断图像空间分辨高，破碎区内部结构清晰，背景干净，实现了金属动态破碎过程的高能 X 射线、高时空分辨、高对比度、大视场、单发次的动态诊断，获得金属材料稀疏破碎过程高置信度的密度分布图像和定量数据，密度诊断不确定度优于 12%，为物理机制的深入认识和物理模型的深化研究提供了具有重要价值的物理图像和数据支撑。

关键词：激光加载 动态破碎 X 射线成像

参考文献

- [1] T. Resseguier, E. Lescoute, A. Sollier, et al. Microjetting from grooved surfaces in metallic samples subjected to laser driven shocks, *J. Appl. Phys.* 2014, 115, 043525.
- [2] J. Xin, W. He, J. Shao, et al. Experimental investigation of fragments recovered from a laser shock loaded tin, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2014, 47, 325304.
- [3] H.-S. Park, B. R. Maddox, E. Giraldez, et al., High-resolution 17–75 keV backlighters for high energy density experiments, *Phys. Plasmas*. 2008, 15, 072705.
- [4] Genbai Chu, Tao Xi, Minghai Yu, et al., High energy X-ray radiography of laser shock loaded metal dynamic fragmentation using high-intensity short-pulse laser, *Rev. Sci. Instrum.* 2018, 89, 115106.

基金项目：国家自然科学基金项目（NO.11804319）等。

流体 RT 不稳定性的烧蚀效应研究

陈伟、赵振朝、史锐锋、旷圆圆、卢艳*

安徽大学物理与材料科学学院，合肥 230601

Email: luyan2003@ahu.edu.cn

摘要：在激光加热等离子体过程中，激光只能在低于临界密度的区域中传播，因此大多数情况都是依靠电子的热传导，将沉积的能量输运到较高密度的等离子体，因此，电子热传导是 ICF 过程中激光靶耦合的关键环节。研究电子热传导带来的烧蚀效应，是获得烧蚀 RT 不稳定物理图像及其发展的重要途径之一。由于烧蚀面附近的密度分布对烧蚀面尖端的电子热传导系数非常敏感，因此本文在 Spitzer-Harm(SH)经典电子热传导模型基础上，引入预热函数 $f(T)$ 来计算分析流体 RT 不稳定的烧蚀效应。这种称为带有预热的电子热传导模型，其热传导系数可表示为 $\kappa = \kappa_{SH} f(T)$ ，其中 κ_{SH} 表示经典电子热传导，预热函数 $f(T) = k_a(1 + k_b/T + k_c/T^{3/2})$ 。由于高能电子或 X 射线预热的严格模拟比较复杂，这里我们通过调节参量 k_a, k_b, k_c 改变预热函数，获取不同烧蚀面宽度引起的不同烧蚀程度，从而研究预热对烧蚀 RT 增长的影响。本课题组利用二维流体欧拉算法程序，对驱动激光与 CH 平面靶耦合进行了数值模拟计算，模拟的激光强度线性增长 4ns 后达到峰值强度 $10^{14} \text{W/cm}^2/\text{s}$ ，然后维持不变，临界密度设为 0.3g/cm^3 ，能量被临界密度附近 20um 的区域均匀吸收。数值模拟中，比较了三种烧蚀程度的电子热传导引起的 RT 不稳定性增长。结果表明，烧蚀程度加大了烧蚀面的宽度，提高了密度梯度标长，因此在线性阶段降低了 RT 线性增长率；非线性阶段，随着轻流体的气泡和重流体的尖钉的相互渗透，系统势能被大大释放，转化为流体动能导致尖钉、气泡的运动，烧蚀情况下尖钉有明显的先加速在减速的趋向，气泡确是一直在增速。进一步对涡量结构的研究表明，气泡顶部涡量聚集和涡量对流是导致气泡加速的一个重要原因。

关键词：烧蚀 RT 电子热传导 尖钉 气泡

参考文献

- 【1】 张维岩，叶文华，吴俊峰等. 激光间接驱动聚变内爆流体不稳定性研究. 中国科学, 2014, 44(1): 1-23.
- 【2】 R. Betti and J. Sanz, Phys. Rev. Letter. 2006,97, 205002
- 【3】 Wang L F, Ye W H, He X T, *et al.* Sci. China-Phys. Mech. Astron. 2017, 60, 055201.
- 【4】 范征峰. 激光烧蚀瑞利—泰勒不稳定性研究, 天津大学博士学位论文, 2008
- 【5】 Wenhua Ye, Weiyang Zhang, and X.T.He, 2002, PhysRevE.65.057401

基金项目：国家自然科学基金项目（NO.11805003）

基于离轴数字全息的非轴等离子体参数诊断分幅系统

刘伟、李欣焱、袁鹏、郑坚*

中国科学技术大学物理学院，合肥 230026

Email: jzheng@ustc.edu.cn

摘要：在惯性约束聚变（ICF）研究中，激光与等离子体相互作用往往有着非常丰富且复杂的物理过程。通过诊断等离子体参数的分布与演化，能够对其中的物理过程做出更加准确合理的解释，同时也能在实验上对现有辐射流体程序进行修正。

光场在通过等离子体时，由于等离子体的折射与吸收效应，其相位和振幅会发生变化。通过采用全息技术，这两个信息能够被同时记录。而且随着电荷耦合器件（CCD）的发展，计算机运算能力的提高，数字全息能够实现在线测量。通过对获得的相位和振幅吸收分布进行处理，有望同时获得等离子体的电子密度与温度分布。

在利用离轴数字全息术获得了等离子体电子密度分布的基础上，我们在中国科学技术大学激光与等离子体相互作用物理基础实验平台，初步搭建了紧凑型四分幅离轴数字全息系统，并开展了相关物理实验。通过数值反演，得到了共跨越 1ns 的四幅铝等离子体电子密度分布的演化。结果表明，该系统横向分辨率约为 25 μm ，相位分辨本领约为 0.1 弧度。

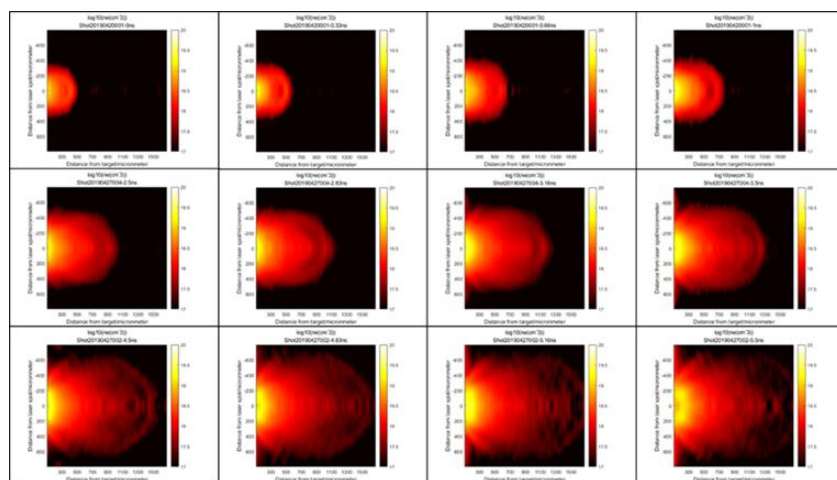


图 1 三发共 12 个时刻铝等离子体电子密度分布演化图

关键词：数字全息 等离子体参数诊断 紧凑型四分幅

参考文献

- 【1】 Etienne Cuche *et al.*, Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms, *Appl. Opt.* 38, 6994-7001 (1999)