

基于碳纳米管泡沫的高效宽谱极紫外辐射

寿寅任¹, 潘卓¹, 曹正轩¹, 王大辉², 王鹏杰¹, 刘建波¹, 梅竹松¹, 孔德锋¹,
赵研英¹, 颜学庆^{1,3,4}, 马文君^{1,3*}

¹北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

²西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024;

³北京激光加速创新中心, 北京 101407;

⁴北京大学应用物理与技术研究中心, 北京 100871

摘要 飞秒激光作用于等离子体可以产生短脉宽、高亮度的极紫外(EUV)辐射,在高分辨率成像、时间分辨谱学等方面都有潜在的应用。为进一步提高辐射亮度,利用相对论飞秒激光与碳纳米管泡沫(CNF)靶相互作用实现了高转换效率的 EUV 辐射。实验结果表明,当激光能量为 1.2 J,CNF 密度为 4 mg/cm³ 时,单发产生的 EUV 辐射光谱强度在 0.1 mJ·nm⁻¹·sr⁻¹量级。相比高密度固体靶,采用低密度 CNF 靶可以有效地提高激光吸收率,进而实现两个量级的 EUV 辐射效率增益。同时发现,基于 CNF 的 EUV 辐射在 15~30 nm 波长范围内具有准连续的宽谱特征,适合于超快吸收光谱等应用。

关键词 X 射线光学; 极紫外辐射; 飞秒激光; 碳纳米管泡沫; 宽谱辐射

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134021

Efficient Extreme-Ultraviolet Continuum from Carbon Nanotube Foams

Shou Yinren¹, Pan Zhuo¹, Cao Zhengxuan¹, Wang Dahui², Wang Pengjie¹, Liu Jianbo¹,
Mei Zhusong¹, Kong Defeng¹, Zhao Yanying¹, Yan Xueqing^{1,3,4}, Ma Wenjun^{1,3*}

¹ State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;

² State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China;

³ Beijing Laser Acceleration Innovation Center, Beijing 101407, China;

⁴ Center for Applied Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract The interaction of femtosecond laser with plasmas can produce ultrashort and brilliant extreme-ultraviolet (EUV) radiations, which can be applied in high-resolution imaging and time-resolved spectroscopy. To further improve the radiance, the high-efficiency generation of EUV radiations from carbon nanotube foam (CNF) targets irradiated by a relativistic femtosecond laser is demonstrated. The experimental result indicates that when the laser energy is 1.2 J and the CNF density is 4 mg/cm³, the single-shot EUV spectrum intensity is around 0.1 mJ·nm⁻¹·sr⁻¹. Compared with high-density solid targets, the low-density CNF targets can effectively improve laser absorptivity, and therefore realize an enhancement of EUV conversion efficiency by two orders of magnitudes. Furthermore, the EUV radiations from CNFs are quasi-continuum in the wavelength range of 15–30 nm, which is suitable for applications including ultrafast absorption spectroscopy.

Key words X-ray optics; extreme-ultraviolet radiation; femtosecond laser; carbon nanotube foams; continuum radiation

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-02-25; 录用日期: 2022-03-03

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFF01014402)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(11921006)

通信作者: *wenjun.ma@pku.edu.cn

1 引言

极紫外辐射在光谱上位于软 X 射线和深紫外辐射之间,其大致的波长范围为 5~40 nm,对应的光子能量范围为 30~250 eV^[1]。相比可见光,极紫外辐射的短波长使其在高分辨率成像和高精度光刻等应用上有天然的优势^[2-3]。与此同时,极紫外辐射的光子能量适中,与大多数原子的中层或外层电子能级相当,适合被应用于元素和化学分析等材料科学中,故极紫外辐射受到了广泛关注。目前较为常见的极紫外辐射源主要基于加速器和等离子体这两种不同的产生方式。基于加速器的极紫外辐射源包括同步辐射和自由电子激光等,其特点是光源装置大、光束品质高,如大连极紫外自由电子激光可输出单脉冲能量大于 100 μJ 的飞秒极紫外脉冲^[4]。为减小装置尺寸,Wang 等^[5]利用激光尾波场加速器结合传统波荡器实现了 27 nm 波段的台面式自由电子激光。与基于加速器的极紫外辐射源相比,基于等离子体的极紫外辐射源体积较小,适合于实验室和工业应用,根据其驱动方式的不同,可分为气体放电光源^[6]和激光驱动光源。

激光驱动极紫外辐射源也有多种不同的产生机制。其中,高次谐波机制产生的极紫外辐射具有良好的时空相干性和准直性,但其单发能量较低^[7]。等离子体发光机制转化效率更高,有更广泛的适用性,是目前主流的方法,其主要原理是将高功率激光聚焦于靶材表面上,瞬间产生高温高密的等离子体,再通过原子辐射过程产生极紫外辐射。这种激光等离子体(LPP)光源产生的 13.5 nm 极紫外辐射已经被成功应用于新一代商用光刻机中,为实现更小节点光刻、延续摩尔定律提供了坚实的基础^[8]。为提高激光到极紫外辐射的能量转换效率,采用了双脉冲激光的方案,即先使用预脉冲将液锡靶转化为亚微米级薄雾,再利用主脉冲进行加热^[2]。国内也开展了一系列 LPP 极紫外光源的研究。例如:李镇广等^[9]发现使用带有百微米级别的凹槽结构的锡靶可以提高纳秒激光驱动的极紫外辐射强度和转换效率;何俊等^[10]发现当皮秒激光作用于固体铅靶时可以产生宽谱的超极紫外辐射。

与以往提高激光到极紫外辐射转换效率的方法不同,本文利用飞秒激光与碳纳米管泡沫(CNF)靶来实现高效率的极紫外辐射。碳纳米管泡沫具有直径仅为几十纳米的碳纳米管纤维组成的三维稀疏结构,密度比传统固体低二到三个量级,在被激光电离

后可形成在微米尺度均匀的临界密度等离子体,已经被成功应用于相对论激光整形、超有质动力电子加速和激光离子加速等研究领域中^[11-14]。激光在临近临界密度等离子体中可传输数十微米并被强烈吸收,实现了大体积的高温等离子体区,从而可有效辐射极紫外光子。这种高亮度极紫外辐射具有宽谱的特征,有助于时间分辨极紫外吸收结构谱等的应用^[15]。当然这种宽谱极紫外辐射也可以通过多层膜反射镜来同时实现收集和选能^[16-17],进而可以被应用于先进光刻等领域中。

2 基本原理

2.1 实验方案

实验在北京大学激光等离子体实验室的 200 TW 钛宝石激光器上开展,其布局如图 1 所示。实验中使用了单等离子体镜系统^[18]来提高激光对比度(激光峰值功率与预脉冲功率之比),从而避免碳纳米管泡沫靶被激光预脉冲损坏。经过等离子体镜后激光在主脉冲 40 ps 前的对比度优于 10^{12} ,到靶能量为 1.2 J,脉宽为 30 fs。被一个 F 数为 3.75 的离轴抛物面镜(OAP)聚焦后,激光焦斑的半峰全宽为 $5.7 \mu\text{m} \times 6.6 \mu\text{m}$,能量集中度为 35%,对应的峰值功率密度约为 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$,这一功率密度足以在飞秒时间尺度内将碳原子场致电离到 C^{6+} ^[19]。实验中使用了三种不同的靶材,分别为碳纳米管泡沫靶、压缩碳纳米管靶和类金刚石薄膜靶。它们的主要成分均为碳,由于微观结构的不同,故三者的密度分别为 0.004, 0.100, 2.400 g/cm^3 。碳纳米管泡沫靶的超低密度得益于其由几十纳米直径碳纳米管纤维构成的三维框架结构,这一点可以从图 1 中的扫描电镜照片中看到。为了实现激光焦斑和靶的高精度重合,实验中使用了一套精度优于 $5 \mu\text{m}$ 的靶后系统进行定位^[20]。利用一套平场光栅谱仪对激光打靶后产生的极紫外辐射进行实时测量。谱仪中使用了 300 line/mm 的平场光栅(Shimadzu, 30-006)和 X 射线相机(Andor, DO940P-DN),探测的波长范围为 15~50 nm。为减小噪声,在平场光栅谱仪前放置了磁铁来偏转打靶过程中产生的离子和电子。实验中还使用了可切换的 200 nm 厚的铝膜作为极紫外滤片,以排除光栅高阶衍射信号的干扰。

2.2 实验结果

图 2 给出了激光作用于 60 μm 厚碳纳米管泡沫靶和压缩碳纳米管靶后产生的典型极紫外辐射信号,其中 λ 为波长。这里使用的压缩碳纳米管靶是

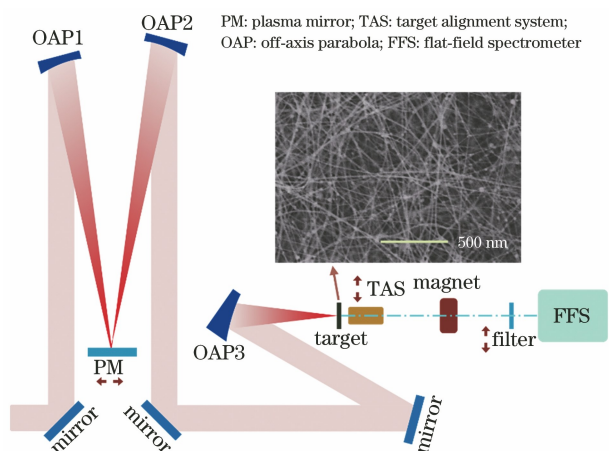


图 1 基于碳纳米管泡沫的高效宽谱极紫外辐射实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of efficient extreme-ultraviolet continuum from carbon nanotube foams

利用无水乙醇对碳纳米管泡沫靶进行收缩处理后得到的,进而两者组成成分完全相同,但压缩后靶材密度提高了数十倍^[21-22]。这种密度的变化导致对应的极紫外辐射强度有非常大的不同,如图 2(a)、(b)所示,压缩碳纳米管靶辐射的极紫外信号强度是压缩前的几十分之一,说明碳纳米管泡沫靶的三维稀疏结构对极紫外辐射效率有决定性提升作用。图 2(c)给出了两种靶材的光谱信号分布,可以发现除了一系列可分辨的线辐射信号外,碳纳米管泡沫靶产生的极紫外辐射具有准连续的光谱特征。

为定量地研究碳纳米管泡沫靶产生的极紫外辐射强度,需要考虑平场光栅谱仪的接收角和效率。谱仪的接收角由其入口的狭缝决定,实验中狭缝距离打靶点 1.0 m,狭缝宽度为 55 μm ,对应的光谱分辨率为 0.03 nm 左右。谱仪的效率,则包括平场光栅的一阶衍射效率和 X 射线电荷耦合器件 (CCD) 的量子效率。图 3 给出了对应厂家提供的平场光栅和 X 射线 CCD 的效率曲线。

考虑接收角和效率曲线校正后,图 4 定量地给出了激光作用于碳纳米管泡沫靶和类金刚石薄膜靶后产生的典型极紫外辐射信号。为排除光栅高阶衍射信号的干扰,谱仪入口前移入了 200 nm 的铝膜作为滤片。经过铝膜后,5~17 nm 波段的极紫外辐射会被滤片强烈吸收,其高阶衍射信号对 17~34 nm 极紫外波段的干扰也相应大大减小。从图 4(a)的原始光谱信号中也可以明显观察到 17 nm 波长附近信号强度的陡变。图 4(c)给出了两种靶材的光谱强度,相比类金刚石薄膜靶,碳纳米管泡沫靶产生的 17~34 nm 极紫外辐射能量有两

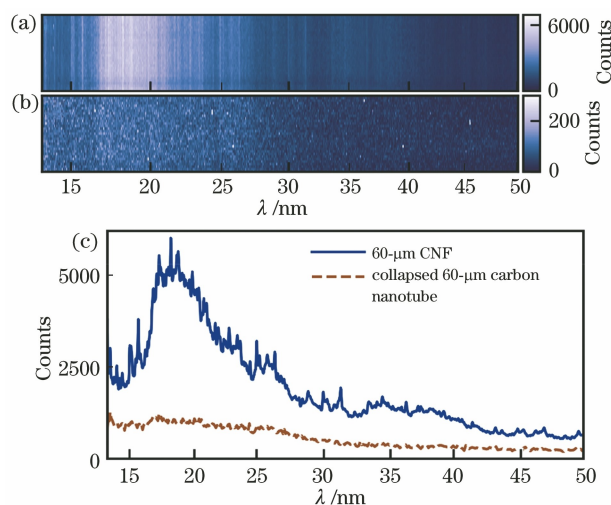


图 2 碳纳米管泡沫靶和压缩后的高密度碳纳米管靶的极紫外辐射信号。(a)60 μm 厚碳纳米管泡沫靶原始光谱信号;(b)压缩后的高密度碳纳米管靶原始光谱信号;(c)光谱信号对比,压缩碳纳米管的信号放大了 10 倍

Fig. 2 Extreme-ultraviolet radiation signals of carbon nanotube foam target and collapsed high-density carbon nanotube target. (a) Raw spectral signal from 60- μm -thick carbon nanotube foam target; (b) raw spectral signal from collapsed high-density carbon nanotube target; (c) comparison of spectral signals, signal from collapsed carbon nanotube target is 10-fold enhanced

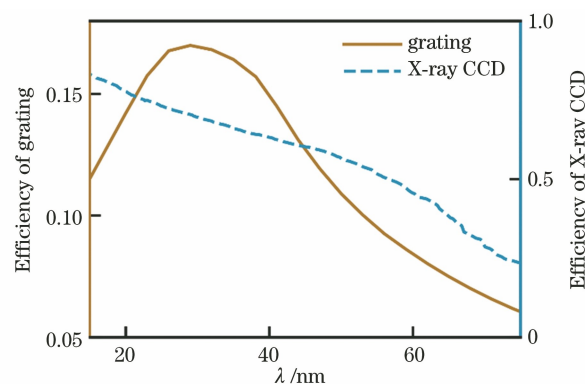


图 3 平场光栅和 X 射线 CCD 的效率曲线

Fig. 3 Efficiency curves of flat-field grating and X-ray CCD 个量级的提高,从定量角度来看,可以达到 0.7 mJ/sr,对应的激光到极紫外辐射的能量转换效率为 0.06 %/sr。除了到极紫外辐射的能量转换效率不同,两种靶材的光谱形状也有明显的不同。类金刚石薄膜靶的辐射光谱具有非常锐利的辐射线,而碳纳米管泡沫靶产生的极紫外辐射以准连续光谱为主。这种高效宽谱的极紫外辐射有助于时间分辨吸收结构谱等的应用^[23]。

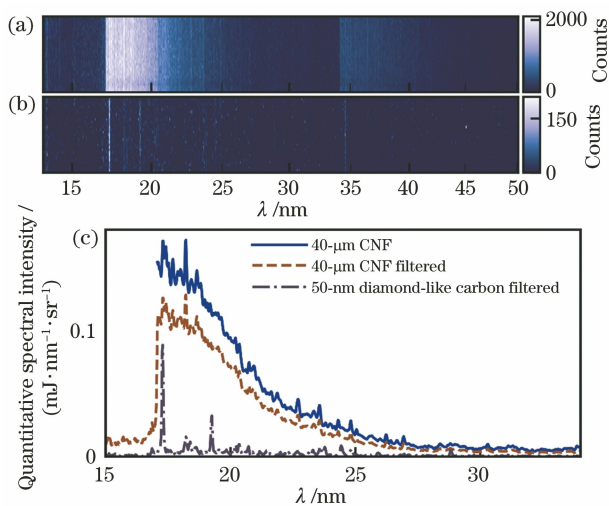


图 4 碳纳米管泡沫靶和类金刚石薄膜靶的极紫外辐射光谱。(a)经过 200 nm 厚的铝膜后 40 μm 碳纳米管泡沫靶的原始光谱信号;(b)50 nm 类金刚石薄膜靶原始光谱信号;(c)反解得到的定量光谱强度对比,类金刚石薄膜靶的结果放大了 10 倍

Fig. 4 Extreme-ultraviolet radiation spectra of carbon nanotube foam target and diamond-like carbon target. (a) Raw spectral signal from 40-μm-thick carbon nanotube foam target after 200-nm-thick Al filter; (b) raw spectral signal from 50-nm-thick diamond-like carbon target; (c) comparison of quantitative spectral intensities obtained by inverse solution, signal from diamond-like carbon target is 10-fold enhanced

除了平场光栅谱仪,实验中还使用光电二极管 (OptoDiode, AXUV100AL) 初步测量了极紫外辐射的空间分布。该二极管表面镀有铝膜来屏蔽可见光的信号,其波长响应曲线如图 5(a) 所示。除了 17~80 nm 的极紫外波段,波长小于 5 nm 的软 X 射线也会在二极管上产生信号,因此二极管的测量结果是对极紫外辐射能量的一种粗略估计。图 5(b) 给出了实验中与激光透射方向成 0° 和 18° 的二极管测量到的辐射能量,说明碳纳米管泡沫靶产生的极紫外辐射是大发散角的。此外,图 5(b) 的误差棒还反映了这种极紫外辐射具有较好的能量稳定性,每个误差棒来自于连续两发测量的结果。比较不同厚度碳纳米管泡沫靶的结果可以发现,本实验条件下当靶材厚度为 60 μm 时辐射效率最高。

3 分析与讨论

实验中测量到的碳纳米管泡沫靶产生的极紫外辐射有高效和宽谱两个特点。其中,效率的提高得

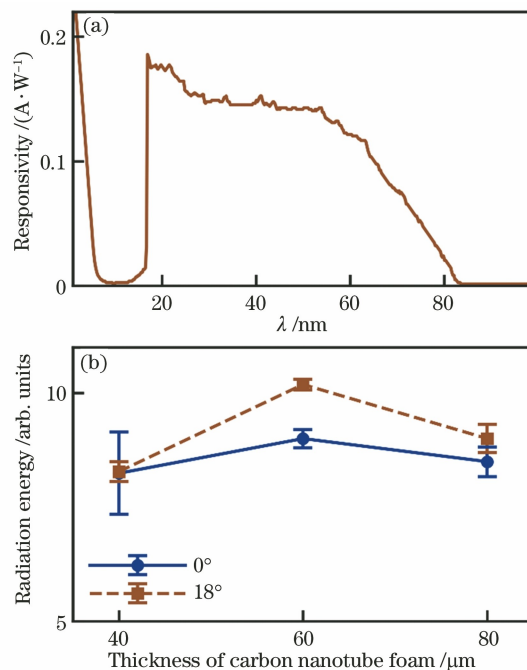


图 5 光电二极管测量结果。(a)光电二极管响应曲线;(b)不同角度、不同厚度碳纳米管泡沫靶测量结果

Fig. 5 Measured results of photodiode. (a) Responsivity curve of photodiode; (b) measured results from carbon nanotube foam targets with varied thicknesses at different directions

益于碳纳米管泡沫靶的三维稀疏结构对激光的强烈吸收。图 6(a) 给出了利用二维粒子云 (PIC) 模拟程序 SMILEI^[24] 仿真激光与等离子体相互作用过程得到的碳纳米管泡沫靶和类金刚石薄膜靶的激光吸收率。模拟中根据实验参数,分别设置了长度为 40 μm、电子密度为 0.7n_c 和长度为 80 nm、电子密度为 240n_c 的 C⁶⁺ 等离子体来对应碳纳米管泡沫靶和类金刚石薄膜靶,其中 n_c = 1.75 × 10²¹ cm⁻³ 为 800 nm 波长激光对应的临界密度。对于高密度的类金刚石薄膜靶,激光无法进入靶体内部,电子加热过程以 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 为主,大部分的激光能量被反射,激光吸收率为 12%,其中 \mathbf{J} 为靶面电流, \mathbf{B} 为激光磁场。对于临界密度的碳纳米管泡沫靶,激光可以在靶体内部传输,形成数十微米长的等离子体通道,如图 6(b) 所示。其中, B_z 为自生磁场。在激光场和自生磁场的共同作用下,电子加热过程为激光直接加速 (DLA),激光能量可有效地被转换为电子动能,激光吸收率可高达 86%。

宽谱的特点与辐射来源有关。对于碳纳米管泡沫靶,其极紫外辐射主要有两个可能的来源:1) 相对论高能电子;2) 等离子体热过程。当速度接近光速的电子被强烈偏转时,会在其运动前方产生类同步

辐射。例如:相对论激光与临界密度等离子体相互作用可以产生半周期的孤立阿秒脉冲,其光谱具有准连续的特征^[25];激光加速电子束在空泡或通道中的 Betatron 振荡可以辐射出宽谱的软 X 射线和极紫外辐射^[26-27]。对于碳纳米管泡沫靶,图 6(c)给出了 PIC 模拟中直接加速电子在通道磁场偏转下的典型

轨迹,这种电子的 Betatron 振荡可以辐射出宽谱的极紫外光子,估算的定量光谱如图 6(d)所示。可以看到,由于激光持续的时间很短,Betatron 辐射的效率不高,比实验测到的值低了两个量级左右,故 Betatron 辐射并不是实验中宽谱极紫外辐射的主要来源。

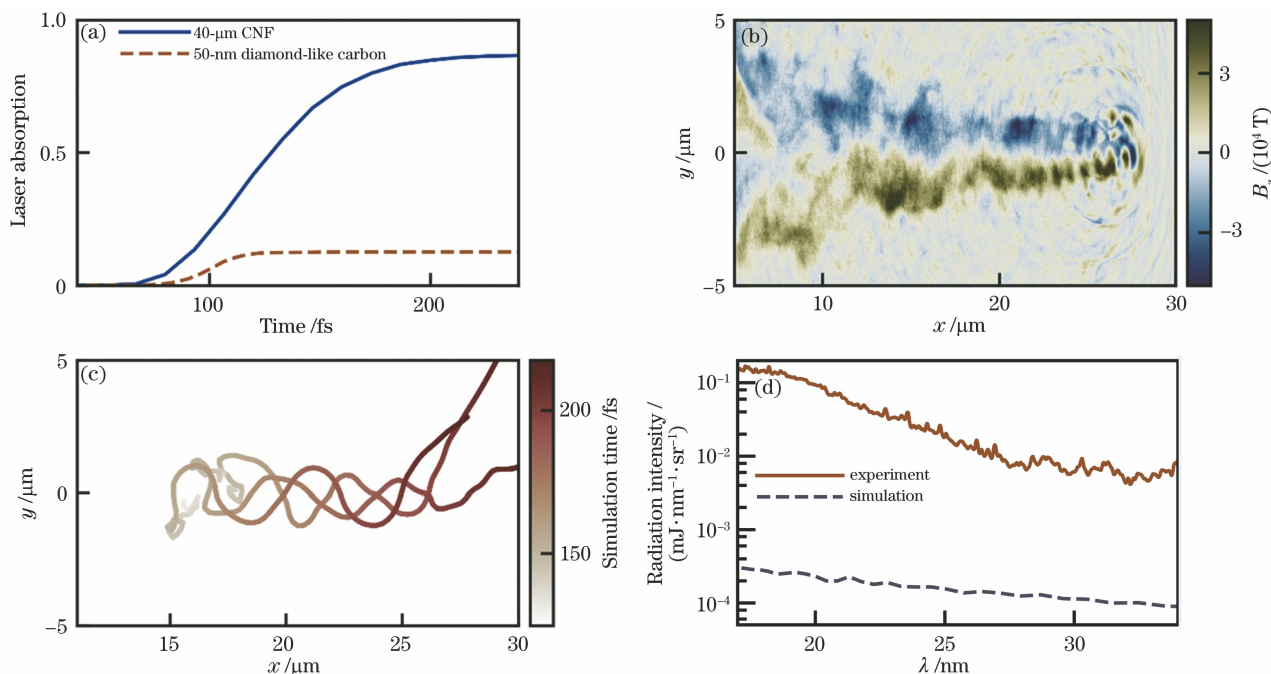


图 6 PIC 模拟结果。(a)激光吸收率对比;(b)激光在碳纳米管泡沫靶中传输形成的强磁场通道;(c)类金刚石管靶电子在通道磁场中振荡的典型轨迹;(d)模拟与实验的极紫外辐射强度对比

Fig. 6 PIC simulation results. (a) Comparison of laser absorptions; (b) strong magnetic channel formed in carbon nanotube foam target along laser propagation direction; (c) typical trajectories of electrons of diamond-like carbon targets wiggled by magnetic field in channel; (d) comparison of extreme-ultraviolet radiation intensity between simulation and experiment

除基于相对论电子的辐射机制外,等离子体热过程中的原子辐射也可以产生准连续的光谱。原子辐射过程可以分为自由电子的轫致辐射、复合辐射和跃迁辐射,前两者和跃迁过程中产生的不可分辨跃迁阵列(UTA)都有宽谱的特点。对于碳纳米管泡沫靶,在激光加热过程结束后,等离子体将经历较长的碰撞和膨胀降温过程。图 7(a)给出了三维 PIC 模拟获得的模拟时间为 530 fs 时的横向电子平均温度分布。可以看到,靶体形成了远超激光焦斑尺度的热等离子体。这样的大体积热等离子体可以高效地发生原子辐射过程,之前也有工作报道了基于飞秒激光和碳纳米管泡沫靶的高效窄带水窗波段线辐射^[28]。考虑到等离子体冷却的时间尺度为皮秒,空间尺度为亚毫米,因此很难直接通过 PIC 模拟获得完整的等离子体温度变化过程来定量地计算原子辐射谱。本文利用辐射动力学程序 FLYCHK^[29]进行

了一个简单的估计。图 7(b)给出了电子温度为 50 eV 和 350 eV 时的典型辐射功率谱,这里设置的等离子体密度为 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 40 μm。同时,根据之前的能量色散谱(EDS)测量结果^[11],由于靶材制备过程中催化剂的影响,故碳纳米管泡沫靶中 C、O、Fe 的原子数占比分别为 95%、3%、2%,简单起见,设置了原子数占比 95%的碳离子和 5%的铁离子。与之前报道的水窗波段窄带线辐射不同^[28],从图 7(b)中可以看到来自原子辐射过程的准连续极紫外光谱,来源主要包括轫致辐射和 Fe^{6+} - Fe^{10+} 离子的 UTA 辐射。从辐射功率角度估计,亚毫米和亚纳秒的百电子伏特热等离子体的辐射光谱与实验测量结果相当。亚纳秒的辐射过程对应亚纳秒的极紫外辐射脉宽,这与之前 Nishikawa 等^[30]报道的飞秒激光作用碳纳米管阵列靶可以获得脉宽为 26 ps 的水窗波段辐射是一致的。当然以上是很粗

略的估计,一些重要的影响因素还有待进一步的研究,如激光焦斑外广大区域内未被激光直接加热均匀的碳纳米管纤维可能保持较高的局域密度,从而提高原子辐射功率并导致显著的谱线斯塔克展宽。

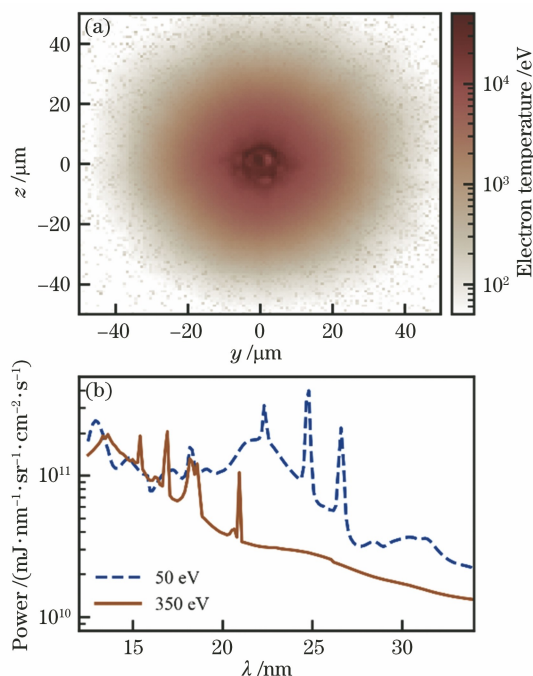


图 7 原子辐射结果。(a)模拟时间为 530 fs 时的横向电子平均温度分布;(b)电子温度为 50 eV 和 350 eV 时的典型辐射功率谱

Fig. 7 Results of atomic radiation. (a) Transverse average electron temperature distribution at simulation time of 530 fs; (b) typical radiation power spectra at electron temperatures of 50 eV and 350 eV

4 结 论

利用相对论飞秒激光与碳纳米管泡沫靶相互作用,在实验中获得了高转换效率的宽谱极紫外辐射。当激光能量为 1.2 J,碳纳米管泡沫密度为 4 mg/cm³时,单发极紫外辐射光谱强度在 0.1 mJ·nm⁻¹·sr⁻¹量级。辐射的高效率得益于碳纳米管泡沫靶的三维稀疏结构形成的近临界密度等离子体对激光能量的强烈吸收。宽谱辐射的来源主要为韧致辐射和 Fe⁶⁺-Fe¹⁰⁺ 离子的 UTA 辐射。利用条纹相机表征极紫外辐射脉宽、通过改变 Fe 原子占比来提高辐射强度和在碳纳米管泡沫靶中掺入 Sn 原子来产生 13.5 nm 波长的光刻辐射,是值得进一步深入的研究方向。

参 考 文 献

[1] Attwood D. Soft X-rays and extreme ultraviolet

radiation: principles and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

- [2] 宗楠, 胡蔚敏, 王志敏, 等. 激光等离子体 13.5 nm 极紫外光刻光源进展[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 28-42. Zong N, Hu W M, Wang Z M, et al. Research progress on laser-produced plasma light source for 13.5 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 28-42.
- [3] Baksh P D, Ostrčil M, Miszczak M, et al. Quantitative and correlative extreme ultraviolet coherent imaging of mouse hippocampal neurons at high resolution[J]. Science Advances, 2020, 6(18): eaaz3025.
- [4] 余永, 李钦明, 杨家岳, 等. 大连极紫外相干光源[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100005. Yu Y, Li Q M, Yang J Y, et al. Dalian extreme ultraviolet coherent light source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100005.
- [5] Wang W T, Feng K, Ke L T, et al. Free-electron lasing at 27 nanometres based on a laser wakefield accelerator[J]. Nature, 2021, 595(7868): 516-520.
- [6] 赵永蓬, 徐强, 李琦, 等. 13.5 nm 放电 Xe 等离子体极紫外光源[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1100001. Zhao Y P, Xu Q, Li Q, et al. 13.5 nm extreme ultraviolet light source based on discharge produced Xe plasma[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1100001.
- [7] 许思源, 李远锋, 朱孝先, 等. 极紫外阿秒脉冲的色散控制及束线设计[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501009. Xu S Y, Li Y F, Zhu X X, et al. Dispersion control and beamline design of extreme ultraviolet attosecond pulses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501009.
- [8] Fomenkov I V, Schafgans A A, Tao Y Z, et al. Industrialization of a robust EUV source for high-volume manufacturing and power scaling beyond 250 W[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10583: 1058327.
- [9] 李镇广, 窦银萍, 谢卓, 等. 结构锡靶激光等离子体极紫外光辐射特性研究[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1601005. Li Z G, Dou Y P, Xie Z, et al. Characteristics of extreme ultraviolet emission from laser-produced plasma on structured Sn target[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1601005.
- [10] 何俊, 吴涛, 杨李. 脉冲激光诱导钨等离子体超极紫外辐射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 191402. He J, Wu T, Yang L. Study on ultraviolet radiation characteristics of pulse laser-induced hafnium plasma[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57

- (19): 191402.
- [11] Wang P J, Qi G J, Pan Z, et al. Fabrication of large-area uniform carbon nanotube foams as near-critical-density targets for laser-plasma experiments [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e29.
- [12] Ma W J, Kim I J, Yu J Q, et al. Laser acceleration of highly energetic carbon ions using a double-layer target composed of slightly underdense plasma and ultrathin foil [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122 (1): 014803.
- [13] Bin J H, Ma W J, Wang H Y, et al. Ion acceleration using relativistic pulse shaping in near-critical-density plasmas [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(6): 064801.
- [14] Wang P J, Gong Z, Lee S G, et al. Super-heavy ions acceleration driven by ultrashort laser pulses at ultrahigh intensity [J]. *Physical Review X*, 2021, 11 (2): 021049.
- [15] 谭伯仲, 阳庆国, 刘冬兵, 等. 基于 M 壳层辐射的 Si K 边 X 射线吸收近边结构谱实验研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0330001.
Tan B Z, Yang Q G, Liu D B, et al. Experimental study on Si K-edge X-ray absorption near-edge structure with M-shell radiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0330001.
- [16] 王占山, 黄秋实, 张众, 等. 极紫外、X 射线和中子薄膜光学元件与系统 [J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0131001.
Wang Z S, Huang Q S, Zhang Z, et al. Extreme ultraviolet, X-ray and neutron thin film optical components and systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0131001.
- [17] 刘陌, 李艳秋. 组合倍率极紫外光刻物镜系统梯度膜设计方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0522001.
Liu M, Li Y Q. Graded multilayer film design method of anamorphic magnification extreme ultraviolet lithography objective system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0522001.
- [18] Choi I W, Jeon C, Lee S G, et al. Highly efficient double plasma mirror producing ultrahigh-contrast multi-petawatt laser pulses [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(23): 6342-6345.
- [19] Ammosov M V, Delone N B, Krainov V P. Tunnel ionization of complex atoms and of atomic ions in an alternating electromagnetic field [J]. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1986, 64(6): 1191.
- [20] Shou Y R, Wang D H, Wang P J, et al. Automated positioning of transparent targets using defocusing method in a laser proton accelerator [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 927: 236-239.
- [21] Futaba D N, Hata K, Yamada T, et al. Shape-engineerable and highly densely packed single-walled carbon nanotubes and their application as supercapacitor electrodes [J]. *Nature Materials*, 2006, 5 (12): 987-994.
- [22] 朱畦, 袁协涛, 诸翊豪, 等. 基于收缩高密度碳纳米管阵列的柔性固态超级电容器 [J]. *物理学报*, 2018, 67(2): 028201.
Zhu Q, Yuan X T, Zhu Y H, et al. Flexible solid-state supercapacitors based on shrunk high-density aligned carbon nanotube arrays [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(2): 028201.
- [23] Ding T, Rebholz M, Aufleger L, et al. Nonlinear coherence effects in transient-absorption ion spectroscopy with stochastic extreme-ultraviolet free-electron laser pulses [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(10): 103001.
- [24] Derouillat J, Beck A, Pérez F, et al. Smilei: a collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation [J]. *Computer Physics Communications*, 2018, 222: 351-373.
- [25] Shou Y R, Hu R H, Gong Z, et al. Cascaded generation of isolated sub-10 attosecond half-cycle pulses [J]. *New Journal of Physics*, 2021, 23(5): 053003.
- [26] Shen X F, Pukhov A, Günther M M, et al. Bright betatron X-rays generation from picosecond laser interactions with long-scale near critical density plasmas [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118 (13): 134102.
- [27] Chen J Y, Xu S, Tang N, et al. Enhanced soft X-ray betatron radiation from a transversely oscillating laser plasma wake [J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13302-13313.
- [28] Shou Y R, Wang D H, Wang P J, et al. High-efficiency generation of narrowband soft X-rays from carbon nanotube foams irradiated by relativistic femtosecond lasers [J]. *Optics Letters*, 2021, 46 (16): 3969-3972.
- [29] Chung H K, Chen M H, Morgan W L, et al. FLYCHK: generalized population kinetics and spectral model for rapid spectroscopic analysis for all elements [J]. *High Energy Density Physics*, 2005, 1 (1): 3-12.
- [30] Nishikawa T, Suzuki S, Watanabe Y, et al. Efficient water-window X-ray pulse generation from femtosecond-laser-produced plasma by using a carbon nanotube target [J]. *Applied Physics B*, 2004, 78(7/8): 885-890.