



·强激光物理与技术·

## 拍瓦激光驱动纳米刷靶高品质质子束的产生\*

杨 月, 孙 斌, 邓志刚, 滕 建, 贺书凯, 张 博, 王少义, 张智猛,  
于明海, 温家星, 谭 放, 闫永宏, 王子涛, 周凯南,  
陈忠靖, 吴玉迟, 周维民, 谷渝秋, 赵宗清

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 超强激光加速产生的高能质子束源在基础物理研究、材料科学、生物医疗等领域具有广泛应用前景。基于激光聚变研究中心的 SILEX-II 装置, 开展了高对比度飞秒激光驱动纳米刷靶质子加速实验研究。采用等离子体镜技术进一步提升激光对比度, 有效降低了预脉冲对纳米刷靶结构的影响。相比于平面靶, 采用纳米刷靶质子截止能量提高到 1.5 倍, 质子束产额增加近一个量级, 成功验证了超高功率密度下纳米刷靶对激光离子加速的增强效果, 并且有效提升了质子束空间分布的均匀性。研究结果为高品质质子束源的产生和应用提供了技术途径。

**关键词:** 纳米刷靶; 激光离子加速; 等离子体镜; 高品质质子束

中图分类号: O434.12

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230440

## Generation of high-quality proton beam in nanobrush targets driven by PW laser pulse

Yang Yue, Sun Bin, Deng Zhigang, Teng Jian, He Shukai, Zhang Bo, Wang Shaoyi, Zhang Zhimeng,  
Yu Minghai, Wen Jiaxing, Tan Fang, Yan Yonghong, Wang Zitao, Zhou Kainan,  
Chen Zhongjing, Wu Yuchi, Zhou Weimin, Gu Yuqiu, Zhao Zongqing

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** High-energy proton beam sources produced by ultra-intense laser acceleration have wide application prospects in basic physics, materials science, biomedical research and other fields. Based on SILEX-II device of Laser Fusion Research Center, the experimental studies on proton acceleration of nanobrush targets driven by high-contrast femtosecond PW laser pulse have been carried out. Plasma mirror technology was used to further improve the laser contrast, which effectively reduces the influence of pre-pulse on the structure of the nanobrush target. Compared with planar target, the proton cut-off energy of nanobrush targets increased to 1.5 times, and the proton beam yield increased by nearly one order of magnitude. This successfully verifies the enhancement of nanobrush targets on laser ion acceleration at ultra-high power density, and the improved uniformity of the proton beam spatial distribution. These results provide a technical way for the generation and application of high-quality proton beam sources.

**Key words:** nanobrush targets, laser ion acceleration, plasma mirror, high-quality proton beam

随着超短超强激光脉冲技术的发展, 超强激光等离子体加速已经成为获得高品质质子束的主要加速方式之一。所加速的高品质质子束也使得激光-物质相互作用的应用领域拓展到惯性约束聚变(ICF)快点火<sup>[1-3]</sup>、癌症治疗<sup>[4]</sup>以及核物理等领域<sup>[5]</sup>。在激光固体靶相互作用过程中, 由于激光被固体靶表面反射损失部分能量, 产生的质子束能量及产额难以满足实际应用的需要, 因此提高激光到固体靶的能量转化效率, 产生高通量高能质子束逐步成为当前激光质子加速研究的一个热点问题<sup>[6]</sup>。

靶前添加微纳结构能够增加激光能量吸收<sup>[7-10]</sup>, 提升超热电子产额和输运效率<sup>[11-16]</sup>, 是获得高通量高能离子束

\* 收稿日期: 2023-12-17; 修订日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(11975214, 12175212)

联系方式: 杨 月, yangy10\_my@163.com。

通信作者: 赵宗清, zhaozongqing99@caep.cn。

的一种有效方式,近年来一系列新型的靶结构被提出用于提升激光吸收效率,产生高品质离子束源。2011年, Bruner 等人依托 HU-HIL (Hebrew University High Intensity Laser facility) 装置利用 20 mJ、40 fs、功率密度  $5 \times 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup> 的激光轰击 H<sub>2</sub>O 雪花靶,在实验上观测到了超过 5.5 MeV 能量的质子产生<sup>[17]</sup>。2012年, Margarone 等人采用直径小于 1  $\mu$ m 的纳米球靶与 100 TW、30 fs、强度  $5 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> 激光相互作用,通过提高超热电子产额与运输调控,使得 1 MeV 以上靶后质子产额提高到平面靶的 5 倍,首次证实微纳结构靶对靶背离子加速的增强效果<sup>[18]</sup>。随后,一系列新的靶型,如光栅靶<sup>[19]</sup>、近临界密度靶<sup>[20]</sup> 等也逐渐被提出并开展了相关的理论和实验研究。

纳米刷靶的靶前具有规则的纳米丝结构,能够增加激光的吸收效率<sup>[21-22]</sup>,在产生高通量、高能离子束方面有其独特的优势。激光与纳米刷靶作用时,由于纳米丝之间存在真空间隙,激光可以在纳米丝内部传输较长距离,将大量电子从纳米丝内部拉出,捕获并加速到较高能量;此外,纳米丝表面形成的自生电磁场能够引导超热电子传输;纳米刷靶产生的高温高密度电子束穿过靶体到达靶背,形成更强的电荷分离鞘场,继而产生高通量、高能离子束。近年来大量关于激光纳米刷靶相互作用的理论和实验工作证实纳米刷靶在增加离子束能量方面有着显著效果。2017年, D. Khaghani 等人首次在德国 GSI 的 PHELIX 激光器上开展激光纳米刷靶离子加速的实验研究,采用 0.5 ps、80 J 的皮秒激光与丝长 30  $\mu$ m、丝间距 2.5  $\mu$ m、直径 1.5  $\mu$ m 的纳米刷靶相互作用,在功率密度为  $2 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> 时观测到了质子能量由 8 MeV 提升到接近 20 MeV<sup>[23]</sup>。但是对于过高激光功率密度,皮秒激光的上升沿会严重破坏靶前的纳米刷结构,纳米丝膨胀形成等离子体阻止激光进入到靶体内部,减弱纳米刷靶对离子加速的增强效果<sup>[24]</sup>。

为了降低激光上升沿对纳米刷结构的破坏,获得高通量的高能质子束,在中国工程物理研究院激光聚变研究中心自主研发的 SILEX-II 装置上开展了基于等等离子体镜的高对比度飞秒激光纳米刷靶质子加速实验研究。实验证实了纳米刷靶在高对比度激光驱动质子束产额和能量的增强效应以及对束斑品质的提升。

## 1 实 验

实验在中物院激光聚变研究中心的 SILEX-II 激光装置上开展,实验排布如图 1(a)所示。实验中利用飞秒拍瓦激光分别驱动平面靶和纳米刷产生高能离子束,利用汤姆逊谱仪 (Thomson Parabola Spectrometer, TPS) 和 RCF 堆栈

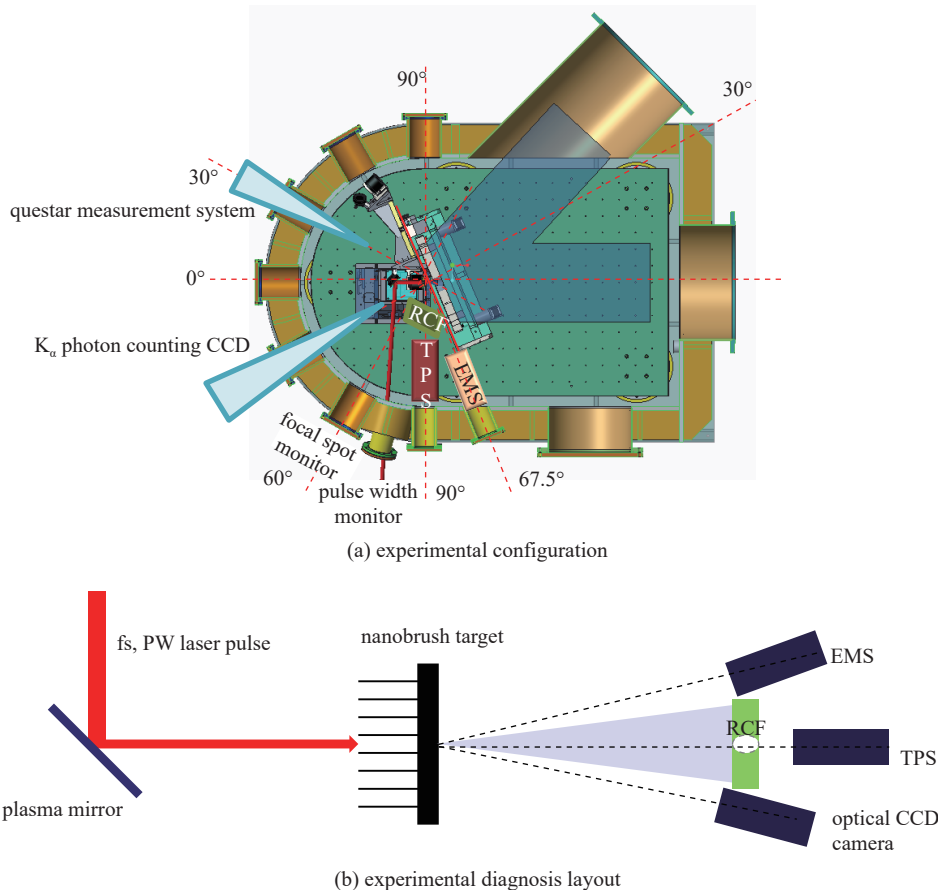


Fig. 1 High-contrast laser nanobrush-target proton acceleration experiment configuration

图 1 高对比度激光纳米刷靶质子加速实验排布

(Radiochromic Film Stack)分别诊断离子能谱和角分布信息,研究纳米刷靶对激光离子加速的增强效果。为提高激光的对比度,降低激光预脉冲对靶前纳米丝结构的影响,实验中采用等离子体技术。在靶前 10 mm 处添加等离子体镜,其法线与入射激光传播方向呈 45°夹角,保证激光反射后能够垂直照射到纳米刷靶面;此时理论计算到达等离子体镜表面的激光功率密度约  $2 \times 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>,经过等离子体镜后激光反射率大于 50%。通过添加等离子体镜,可以降低激光预脉冲 1~2 个数量级,从而保护纳米刷靶的靶前纳米丝结构不受激光预脉冲破坏。

激光装置参数如下:波长 800 nm,能量 30 J,脉宽 30 fs,10 μm 内能量集中度大于 50%,主峰前 20 ps 以外激光对比度达到  $10^{-10}$ 。激光峰值功率预计可以达到  $4 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>。添加等离子体镜后损失部分激光能量,激光到靶能量预计总能量的 40%。实验采用了平面靶与纳米刷靶两种靶。平面靶,材料为 Cu,厚度 5 μm,面积 1 mm×1 mm。纳米刷靶丝长 20 μm,丝直径 0.2 μm,丝间距 0.4 μm,纳米丝材料为 Cu,基底厚度 5 μm,基底材料 Ag。

高对比度激光纳米刷靶质子加速实验诊断布局如图 1(b)所示。纳米刷靶垂直激光传播方向放置,靶后法线 5 cm 处放置 RCF,测量出射离子的能量、发散角、产额等信息;RCF 中心钻孔,保证部分离子出射进入汤姆逊谱仪。汤姆逊谱仪放置靶后法线 38.5 cm 测量出射离子的能量、产额等信息。靶后法线 22.5°夹角(南偏东 22.5°)处放置电子谱仪(Electron Magnetic Spectrometer, EMS),测量靶后超热电子的产额、温度等,用于推断激光功率密度、激光到靶能量转换效率等信息。靶背法线 60°夹角处放置 K<sub>α</sub> 光子计数 CCD,测量激光到 K<sub>α</sub> 光子的能量转化效率。

## 2 结果与讨论

实验中观测到纳米刷靶对离子加速的增强效果。图 2 给出相应的质子能谱和 C<sup>4+</sup>能谱。相比于平面靶,采用纳米刷靶后质子束截止能量由 8.8 MeV 提升到 12.4 MeV,质子能量提升超过 1.5 倍。此外,质子束的产额也得到显著增加,单位立体角内由  $8.9 \times 10^9$  个增加到  $7.4 \times 10^{10}$  个,高能质子的产额增大了近一个数量级。同时,C<sup>4+</sup>的截止能量由 12 MeV 提升到 18 MeV,产额也增加了近一个数量级。结果表明,采用纳米刷靶提升了离子束截止能量,同时显著增加了离子束的产额,证实纳米刷靶能够显著提高激光到高能离子的能量转换效率。

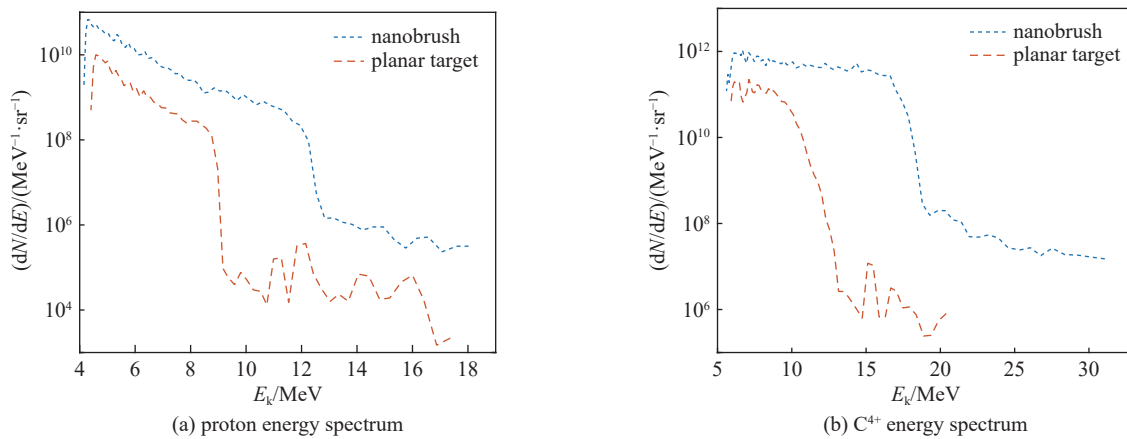


Fig. 2 Ion energy spectra produced by different targets

图 2 不同靶型产生的离子能谱

为了证实纳米刷靶增强离子加速的原因,分析了超热电子产生和能量增益特性。图 3 分别给出平面靶和纳米刷靶的超热电子能谱,其中蓝色实线代表平面靶的超热电子能谱,红色实线代表纳米刷靶的超热电子能谱。采用纳米刷靶后超热电子温度由 0.83 MeV 提高到 2.74 MeV,提升到 3.3 倍。此外,根据能谱给出的单位能量单位立体角内的电子数积分即可获得单位立体角内总的超热电子产额,计算获得产额从平面靶的  $1.7 \times 10^{11}$  个增加到  $6.4 \times 10^{11}$  个,增加到近 4 倍。结果证实了纳米刷靶大幅提升激光到超热电子的能量转换效率,进一步为增强高能离子束的产生提供了基础。

为了进一步验证纳米刷靶增强质子加速的有效性,补充了不同激光功率下平面靶和纳米刷靶实验结果分析对比。

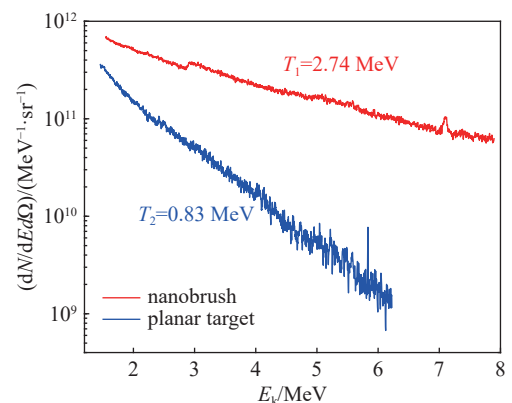


Fig. 3 Hot electron energy spectra produced by different targets

图 3 不同靶型产生的超热电子能谱

通过改变激光的能量和脉宽,研究功率分别为 $(0.62\pm 0.15)$  PW 和 $(0.82\pm 0.20)$  PW 的超强激光与纳米刷靶相互作用的物理参数特性。在两组激光功率下,平面靶和纳米刷靶的实验结果如图4所示。可见相同功率密度下,纳米刷靶无论在超热电子产额、 $K_{\alpha}$ 光子产额以及离子截止能量方面都比平面靶有显著提升。此外,激光功率越低增强效果越明显,高功率比低功率情况下数值提升比例为超热电子产额增大到数十倍、 $K_{\alpha}$ 光子产额近3倍、离子截止能量近1.8倍。这是由于相同激光对比度下,激光功率密度越低,预脉冲强度越弱,对纳米刷靶前微纳结构的破坏作用较小,因此纳米刷靶增强能量吸收和粒子束产生效果更为显著。

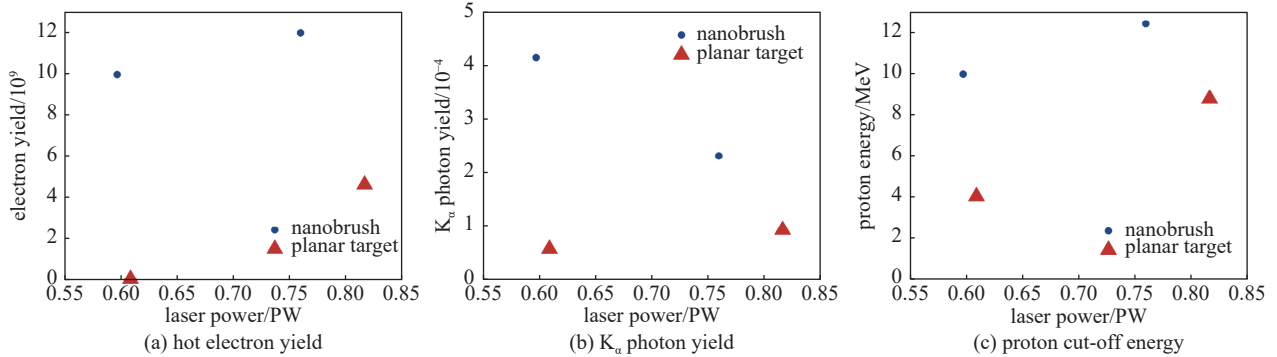


Fig. 4 Comparison of experimental results of two targets at different laser powers

图4 不同激光功率下两种靶的实验结果对比

基于激光驱动平面靶加速的质子束存在空间分布不规则等调制结构,限制了质子束的实际应用。根据实验获得的平面靶和纳米刷靶的离子束斑分布(如图5所示),以图像灰度值标准偏差与平均值的比值量化反映图像的不均匀度,计算得到平面靶分布图前两张数值分别为0.6、0.386,纳米刷靶对应值为0.4、0.344,证明基于纳米刷靶产生质子束斑的不均匀现象得到有效抑制。纳米刷靶产生的离子束不仅在能量及产额方面显著高于平面靶,在束斑分布上也更加均匀,使纳米刷靶更加适用于质子照相等实际应用。

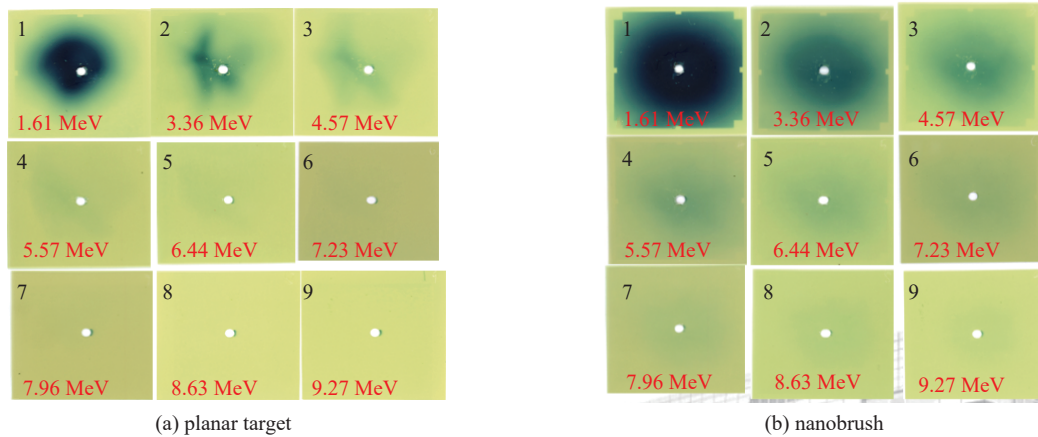


Fig. 5 Proton beam spot distribution of different targets

图5 不同靶型质子束斑分布

### 3 结 论

基于激光聚变研究中心的SILEX-II装置,开展了高对比度飞秒激光驱动纳米刷靶质子加速实验研究。实验中采用了平面靶和纳米刷靶两种靶型,相比于平面靶,纳米刷靶实现了近4倍的超热电子温度及产额增加,1.5倍的质子束能量提升和近一个量级的质子束产额的增加,显著提高了激光-质子能量转化效率,改善了质子束空间分布的均匀性。实验验证了拍瓦激光功率下微纳结构靶对质子加速的增强效果,为质子束在惯性约束聚变、激光核物理等领域的应用奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] Tabak M, Clark D S, Hatchett S P, et al. Review of progress in fast ignition[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12: 057305.
- [2] Cai Hongbo, Mima K, Zhou Weimin, et al. Enhancing the number of high-energy electrons deposited to a compressed pellet via double cones in fast ignition[J].

- [Physical Review Letters](#), 2009, 102: 245001.
- [3] Roth M, Cowan T E, Key M H, et al. Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams[J]. [Physical Review Letters](#), 2001, 86(3): 436-439.
- [4] Malka V, Fritzier S, Lefebvre E, et al. Practicability of protontherapy using compact laser systems[J]. [Medical Physics](#), 2004, 31(6): 1587-1592.
- [5] Wang Jian, Zhao Zongqing, He Weihua, et al. Radiography of a  $K_{\alpha}$  X-ray source generated through ultrahigh picosecond laser-nanostructure target interaction[J]. [Chinese Optics Letters](#), 2015, 13: 031001.
- [6] Curtis A, Hollinger R, Calvi C, et al. Ion acceleration and D-D fusion neutron generation in relativistically transparent deuterated nanowire arrays[J]. [Physical Review Research](#), 2021, 3: 043181.
- [7] Chao Yue, Cao Lihua, Zheng Chunyang, et al. Enhanced proton acceleration from laser interaction with a tailored nanowire target[J]. [Applied Sciences](#), 2022, 12: 1153.
- [8] Cao Lihua, Gu Yuqiu, Zhao Zongqing, et al. Enhanced absorption of intense short-pulse laser light by subwavelength nanolayered target[J]. [Physics of Plasmas](#), 2010, 17: 043103.
- [9] Cao Lihua, Gu Yuqiu, Zhao Zongqing, et al. Control of the hot electrons produced by laser interaction with nanolayered target[J]. [Physics of Plasmas](#), 2010, 17: 103106.
- [10] Eftekhari-Zadeh E, Blümcke M S, Samsonova Z, et al. Laser energy absorption and X-ray generation in nanowire arrays irradiated by relativistically intense ultra-high contrast femtosecond laser pulses[J]. [Physics of Plasmas](#), 2022, 29: 013301.
- [11] Zhao Zongqing, Cao Lihua, Cao Leifeng, et al. Acceleration and guiding of fast electrons by a nanobrush target[J]. [Physics of Plasmas](#), 2010, 17: 123108.
- [12] Ji Yanling, Jiang Gang, Wu Weidong, et al. Efficient generation and transportation of energetic electrons in a carbon nanotube array target[J]. [Applied Physics Letters](#), 2010, 96: 041504.
- [13] Li Boyuan, Zhang Zhimeng, Wang Jian, et al. Transport of fast electrons in a nanowire array with collisional effects included[J]. [Physics of Plasmas](#), 2015, 22: 123118.
- [14] Yang Yue, Li Boyuan, Yan Yonghong, et al. Investigation on the transport efficiency of fast electrons with double-layer  $K_{\alpha}$  fluorescence measurement[J]. [Physics of Plasmas](#), 2019, 26: 073101.
- [15] Yang Yue, Li Boyuan, Wu Yuchi, et al. Manipulation and optimization of electron transport by nanopore array targets[J]. [Plasma Science and Technology](#), 2021, 23: 015001.
- [16] Ong J F, Ghenuche P, Tanaka K A. Electron transport in a nanowire irradiated by an intense laser pulse[J]. [Physical Review Research](#), 2021, 3: 033262.
- [17] Bruner N, Schleifer E, Palchan T, et al. Generation of fast protons by interaction of modest laser intensities with  $H_2O$  “snow” nano-wire targets[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 653(1): 156-158.
- [18] Margarone D, Klimo O, Kim I J, et al. Laser-driven proton acceleration enhancement by nanostructured foils[J]. [Physical Review Letters](#), 2012, 109: 234801.
- [19] Ceccotti T, Floquet V, Sgattoni A, et al. Evidence of resonant surface-wave excitation in the relativistic regime through measurements of proton acceleration from grating targets[J]. [Physical Review Letters](#), 2013, 111: 185001.
- [20] Ma Wenjun, Kim I J, Yu Jinqing, 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: 014803.
- [21] Yu Jinqing, Zhou Weimin, Cao Lihua, et al. Enhancement in coupling efficiency from laser to forward hot electrons by conical nanolayered targets[J]. [Applied Physics Letters](#), 2012, 100: 204101.
- [22] Park J, Tommasini R, Shepherd R, et al. Absolute laser energy absorption measurement of relativistic 0.7 ps laser pulses in nanowire arrays[J]. [Physics of Plasmas](#), 2021, 28: 023302.
- [23] Khaghani D, Lobet M, Borm B, et al. Enhancing laser-driven proton acceleration by using micro-pillar arrays at high drive energy[J]. [Scientific Reports](#), 2017, 7: 11366.
- [24] Cristoforetti G, Londrillo P, Singh P K, et al. Transition from coherent to stochastic electron heating in ultrashort relativistic laser interaction with structured targets[J]. [Scientific Reports](#), 2017, 7: 1479.