CLPU 超强激光-物质相互作用用高重复频率固体带靶输送系统

Michael Ehret[1]，∗，Diego de Luis [1]，Jon Imanol Apin˜ aniz [1]，Jose Luis Henares [1]，Roberto Lera [1]，Jose´ Antonio Pe´ rez-Herna´ ndez [1]，Pilar Puyuelo-Valdes [1]，Luca Volpe [2]，以及 Giancarlo Gatti[1]
[1] 脉冲激光中心（CLPU），Villamayor，西班牙[2] 马德里理工大学土木工程高等技术学院，马德里，西班牙

通讯作者*：Michael Ehret，脉冲激光中心，C/ Adaja 8，37185 Villamayor，西班牙 mehret@clpu.es

摘要

位于脉冲激光中心（CLPU）的 VEGA-3 激光系统可提供最高功率为 1 PW、重复频率为 1 Hz 的激光脉冲，聚焦强度最高可达 2.5×10^{20} W cm^{-2}。本文介绍了一种适用于该重复频率的多功能紧凑型靶系统方案。该系统能够在靠近激光-等离子体相互作用区域的严苛拍瓦激光环境中运行。带材卷绕在带靶系统的卷轴上，从而为每个发次将固体密度靶输送至激光焦点。本文展示了不同带材和厚度下的实验结果。实验离子能谱由与闪烁体屏耦合的汤姆孙抛物线离子谱仪记录；同时使用天线阵列表征电磁脉冲。两种诊断的结果均表明，该系统具有良好的逐发稳定性。

关键词：激光-等离子体加速器、高重复频率、带状靶、相对论激光相互作用、烧蚀、微结构

1 引言

过去几十年的技术进步 [1, 2, 3, 4] 使如今众多PW级钛宝石激光系统得以问世。当激光紧密聚焦于物质上时，相对论相互作用区可产生带电粒子束 [5], 、中子 [6] 和X射线 [7]等激光驱动源。通过靶法线鞘层加速（TNSA）、辐射压加速（RPA）等广为人知的机制，可从固体密度靶产生明亮的脉冲离子束[8]。许多科学与技术领域的应用都受益于激光驱动离子束，例如同位素生产 [9], 、正电子发射断层成像 [10], 、离子束显微术 [11], 、粒子诱发X射线发射（PIXE）[12] 以及惯性约束聚变[13]。

目前，激光驱动源面临的最重要技术难题是重复频率，因为激光摧毁固体密度靶后必须更换靶，由此产生诸多困难。对于上述大多数应用，高重复频率（HRR）运行 >1 Hz 是一项重要要求，因此需要高重复频率靶系统方案。目前正在探索几种方法，例如制备低温带材 [14], 、使用液体射流 [15, 16] ，或在相互作用位置附近展开薄带 [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]。这些方案都能自动快速更新靶表面，并可在高真空条件下连续运行，提供数万个靶。带状靶的真空兼容性良好，因此脱颖而出。

本文介绍了在Centro de Laseres PUlsados（CLPU）开发的、用于PW运行的带靶系统（TaTaS-PW）。该系统基于此前开发的一代系统，运行功率最高可达150太瓦 [24]。本文结构如下：首先介绍实验装置和方法；其次比较高重复频率带式靶与单独对准的带状靶的实验结果；第三，讨论提高重复频率的后续步骤；最后总结并展望未来的实验应用。

2 材料与方法

本研究的实验在 CLPU 的 VEGA-3激光设施中进行。在该设施中，钛宝石激光器脉冲被放大至每个脉冲能量 E_L 高达 30 J，并压缩至持续时间 τ_L 为 28 fs。压缩后，短激光脉冲在 1×10^{-6} mbar 的高真空环境中传输至一台焦距为 f = 2.5 m 的离轴抛物面镜。半高全宽（FWHM）为 d_L = 12 μm 的焦斑对准相互作用平面，并在本研究期间保持尺寸不变。本研究期间，每个脉冲的激光能量和持续时间并不恒定；这些参数经过了受控调整，激光脉冲持续时间在 28 fs 至 160 fs 之间，靶上的激光脉冲能量则在 9 J 至 28 J 之间。在此范围内，系统提供的强度从 1×10^{19} W cm^{-2} 到 2×10^{20} W cm^{-2}。靶上能量根据低能量下记录的校准数据进行外推；高能量下的焦斑估算与低能量测量时相同。在本实验中，低功率下靶上能量的 24% 集中在第一个艾里斑内。脉冲持续时间通过二次谐波自相关仪系统进行逐发测量；该系统诊断的是位于抛物面镜与焦点之间的薄膜所产生的微弱反射。

固体密度靶放置在激光焦点位置，并相对于激光轴倾斜 12.5°，以避免反射光返回激光放大器。由于 VEGA激光脉冲没有足以诱发靶透明化或击穿的预脉冲 [28], ，在当前激光和靶参数下，带电粒子的主要加速机制是 TNSA [29, 30] 。在 TNSA 中，一群激光加热的相对论性电子逃离靶，随后势演化形成鞘层电场，能够将电离的表面污染物加速至数十 MeV u^{-1} [31]。采用配备闪烁体屏 [32] 的汤姆孙抛物线谱仪（TP），根据能量和荷质比辨别加速离子。该谱仪用于探测沿靶表面法线方向加速的离子；每次发次都会拍摄闪烁体屏，并使用在线分析工具 IOSSR [33]对图像进行后处理。

激光-等离子体相互作用会产生宽带电磁脉冲（EMP）[25]。其中一个来源是空间电荷场：由于激光驱动的靶放电[26],，相互作用腔室内的靶处于正电位，而真空腔室壁处于负电位，从而形成该电场。电场和磁场的大小及模态结构取决于相互作用腔室的尺寸以及初始空间电荷分布。VEGA-3 中典型的腔体谐振频段为甚高频（VHF），尤其是数百兆赫 [27]。人们使用市售的校准磁场和电场天线来捕捉相互作用腔室内的电磁波：磁场天线 MDF-9400（9 千赫± 400 兆赫，Aaronia AG）和电场天线 OmniLOG-30800（300 兆赫± 8 吉赫，AaroniaAG）。MDF-9400 放置在靶后方 30 cm 处，沿激光轴布置；OmniLOG-30800 则放置在靶后方 30 cm、右侧 30 cm 处（沿激光方向），两者均朝向相互作用点。信号通过校准的双层屏蔽 SMA 电缆传输，并经由浮动馈通件引出。使用带宽为 2 GHz、采样率为 10 GS/s 的示波器采集波形。SMA 电缆中屏蔽层的接地是

通过示波器实现的。所有电磁脉冲信号均针对测量电路中各元件的频率相关衰减进行了校正。

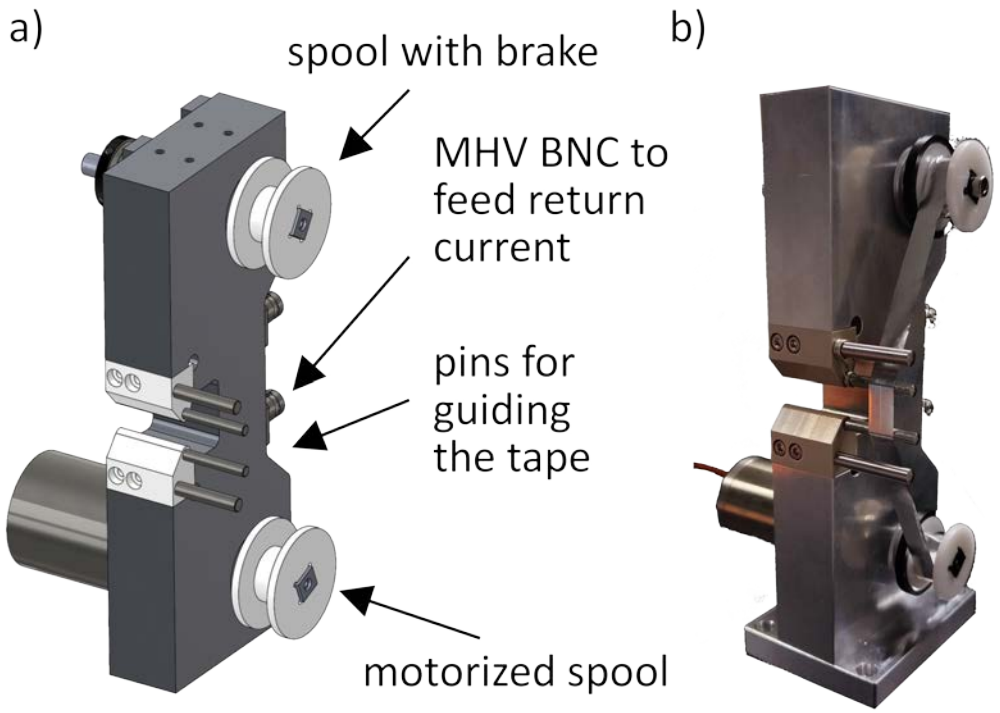

图 1. 用于 VEGA-3 拍瓦级激光发次的带靶系统：(a) CAD 示意图中的技术细节，例如 (i) 跨越断口运行的卷轴；(ii) 电动卷轴；以及 (iii) 将带材固定在焦点位置的接地销；(b) 系统的照片。请注意，销通过 MHV-BNC 接头与地线导电连接，以确保接地。

带靶系统 TaTaS-PW 如图 1 所示。该系统在激光发次之间卷绕运行，将数微米厚、数毫米宽的固体密度条带输送通过激光焦平面。TaTaS-PW 系统的主框架由一块铝制成，其中包含 (i) 两根用于安装带材卷绕系统的轴，以及 (ii) 两个由聚醚醚酮制成、在激光-粒子平面两侧相对放置的塑料齿；塑料齿上装有引导带材通过激光焦平面的金属销。

(i) 卷带系统由一个步进电机 Phytron VSS42 驱动的卷轴组成，该卷轴从另一个卷轴上拉出带材；后者连接着制动力矩为 2.5 N cm 的制动系统，以使带材保持张紧。两个卷轴均由电介质材料制成，以隔离带材和主框架。此外，电机与主框架隔离，以避免破坏性强电流流向电机控制器，例如由光电离或停留在主框架上的相对论电子所触发的电流。

(ii) 间距为 ±5 mm 的水平销钉可确保带材保持在激光焦平面内。表 1 列出了不同带材材料的带材表面法向位置稳定性。表面位置的均方根（RMS）偏差小于 VEGA-3 的瑞利长度，其数值为

根据抛物面镜的光束直径和焦距，估算为 ≈ 130 μm。选择聚醚醚酮作为销钉安装结构的材料，可确保带材与主框架绝缘。销钉可通过 MHV-BNC 连接器接地至任意点。在本研究中，通过真空腔内的光学平台实现接地。

表 1. 胶带靶位置沿垂直于其表面的方向相对于初始对准的焦斑位置的均方根涨落。表中还给出了相对于激光纵向方向的投影（负号表示朝向聚焦抛物面镜的位移）。

Tape	胶带的稳定平面（法向）/[μm]	纵向投影（激光）/[μm]
Al	-64 ± 24	-62 ± 23
Kapton（89-K-l-ad）	-3.0 ± 3.3	-2.9 ± 3.2
Kapton增强铝（9-Al-e-K）	-15 ± 39	-15 ± 38

该系统支持灵活调整运行方式：卷轴直径和宽度可根据所需带材进行调整；控制器单元可自由调节速度和加速度等参数；卷轴和 PEEK齿也可在损坏时迅速更换。该装置可用于激光±物质相互作用研究所需的多种几何形状，并在赤道面上为观察靶提供 310° 自由视角，见图 2。

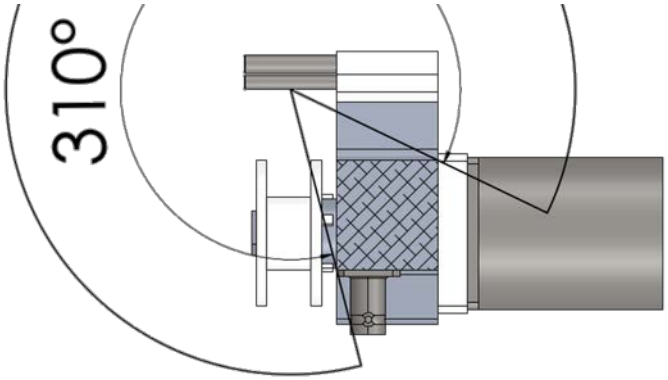

图2. 带靶系统的俯视图，沿水平方向剖切，并标示了能够无遮挡地观察带上相互作用点的范围。

3 结果与讨论

带系统能够以 0.05 Hz 的频率，每隔 20 次激光发次将一卷厚 9 μm 的铝带向前输送若干厘米；激光也以相同频率发射，最佳压缩下能量为 (0.70 ± 0.12) PW。对于这种情况，TNSA 谱中的质子截止能量为 (10.68 ± 0.16) MeV，见图3。截止能量的发次间标准差为 1.5%。重复频率受到限制，是因为为避免电磁脉冲造成干扰，带控制器在发次期间与系统断开，并在随后重新连接。实验结果是在包含 39 次发次的脉冲串中获得的，运行频率外推为每小时 180 次发次。除了展示最大性能外，研究还考察了不同带材类型的性能以及结构化带材的影响。

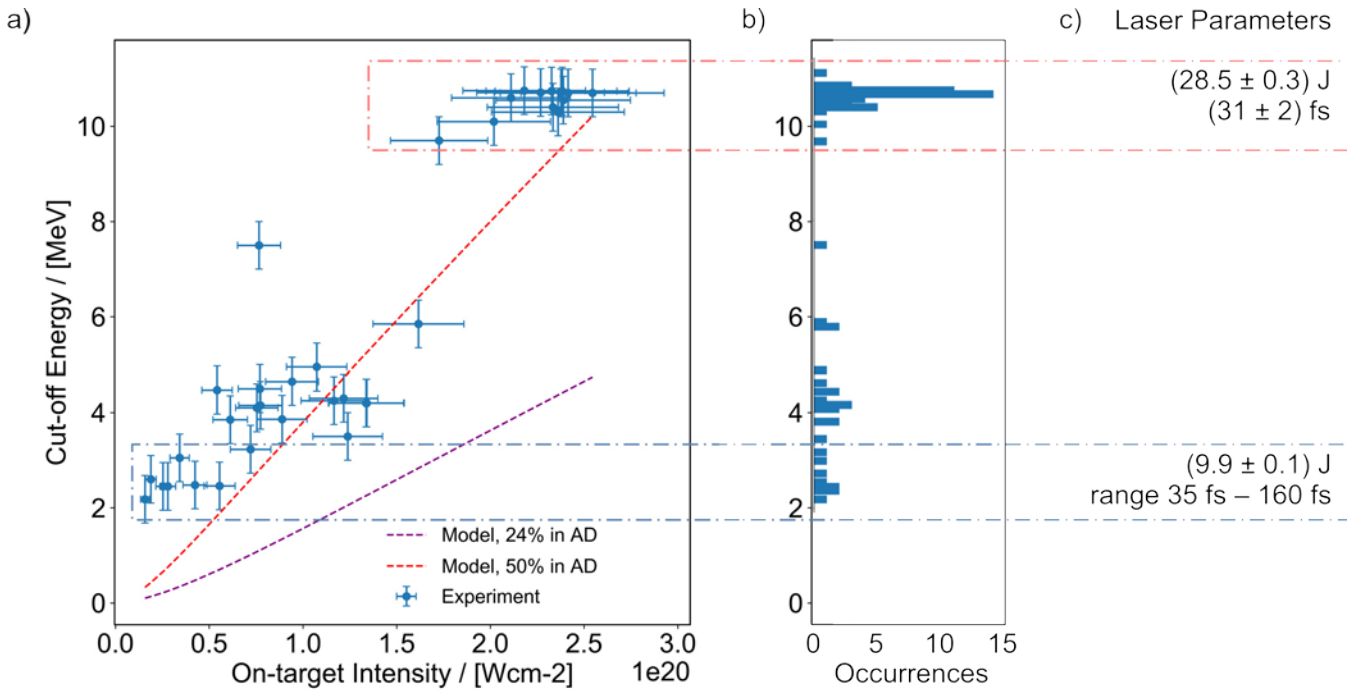

图3。记录了在焦斑尺寸固定、但激光脉冲能量和持续时间变化时加速质子束的光谱截止能量，结果对应 Tape 9-Al-e-K。(a) 截止能量与修正的 Schreiber 模型相符 [37]。(b) 直方图显示，在激光参数相近的情况下，以 0.05 Hz 运行的 39 发次脉冲串呈现窄峰，能量为 (10.68 ± 0.16) MeV。(c) 即使激光脉冲持续时间发生较大变化，只要脉冲能量保持恒定在 (9.9 ± 0.1) J，截止能量也相近。

3.1 标准胶带研究

图3展示了使用宽 10 mm、厚 9 µm 的铝带进行的所有发次。铝带边缘用 Kapton 胶带加固[1]（下文称为 Tape 9-Al-e-K）。值得注意的是，边缘各留出一条毫米宽的窄带，以使带材在内侧销钉上滑动得更顺畅，并避免带材断裂，见图4（a）。实验结果与修正的 Schreiber 模型[36, 37] 在宽范围的激光脉冲能量和持续时间下进行比较。在这一强度范围内，如果将激光能量中落在第一个艾里斑（AD）内的比例设为 50%，模型预测值与测得的截止能量大致吻合，强度范围为$1 \times 10^{19}\,\mathrm{W^2\,cm^{-1}}$至$1 \times 10^{20}\,\mathrm{W^2\,cm^{-1}}$。采用实验测得的 24% 时，模型对截止能量的预测低了 2.5 倍。模型计算中，电子束发散角依据 Debayle 模型[38] 估算，而非通过测量获得，这可能是造成差异的主要原因。

将 Tape 9-Al-e-K 与一条厚 89 µm、背面带有薄层硅胶粘合剂的 Kapton 胶带（下文称为 Tape 89-K-l-ad）进行比较。图 4 (b) 展示了 Tape 89-K-l-ad：在较低激光脉冲能量下形成圆形烧蚀孔，而在较高能量下则呈现不对称形状。在激光参数相当的情况下，Tape 89-K-l-ad 的蒸发体积大于 Tape 9-Al-e-K。将这两种带材与一条厚 9 µm、由靶材基体固定的铝带单发参考样品进行比较。与卷轴带材上的发次不同，每次发次中单发参考样品都会相对于激光焦点进行对准。图 5 显示了相应发次的质子截止能量。三种情况下的变化趋势相同，不同类型之间的截止能量差异均未超出其不确定度范围。对于最高激光脉冲能量下、处于最佳压缩的发次，厚 89 µm 的 Kapton 靶能够达到与厚 9 µm 的铝靶相同的截止能量。

[1] 超高真空聚酰亚胺胶带，硅胶粘合剂，销售商 LewVac，尺寸：宽 12.7mm、厚 0.0889mm、长 32m，购于 2020年7月

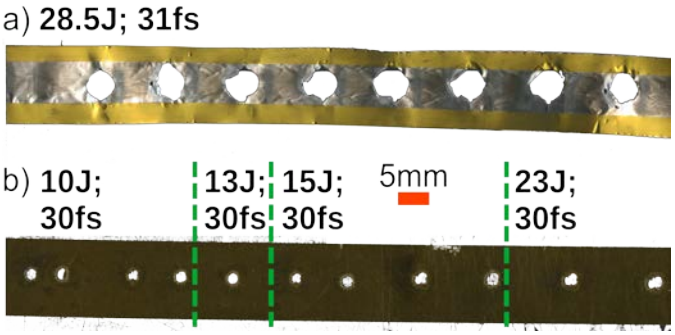

图 4. 实验中使用的带材类型，分别为激光发次后扫描的结果，并标注了相应的激光脉冲参数。(a) Tape 9-Al-e-K，其两侧边缘各粘有一条毫米厚的条带；(b) Tape 89-K-l-ad 纯 Kapton 胶带，其背面涂有硅胶粘合剂。(a) 和 (b) 的比例尺相同。

其中涉及的机制应作为未来工作的研究内容；但等离子体参数诊断和离子加速超出了本研究的范围。铝带与单发参考样品之间的可比性，是证明该系统具有单发对准稳定性的关键依据。

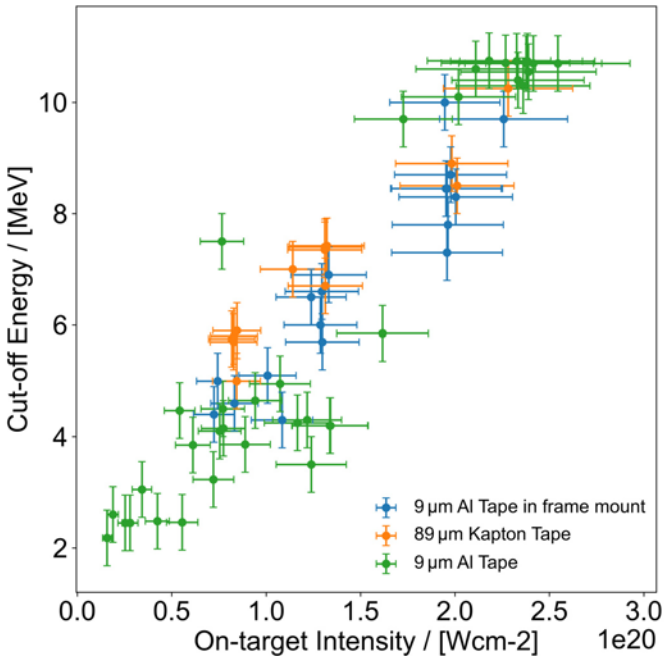

图 5. 在焦斑尺寸固定的情况下，改变激光脉冲能量和持续时间，记录三种带材类型所产生的加速质子束的光谱截止能量。

激光加速质子的截止能量稳定性是质子源稳定性的基准。在将离子束用于次级样品的实验中，这一指标无法获取。离子束与样品相互作用后，其束流性质会发生变化，例如无法确定有多少质子在样品内部损失了全部能量而未能透射。本文探讨在此类情况下能否利用电磁脉冲进行计量，以监测稳定性。甚高频波段的幅值谱对实验装置的变化十分敏感 [27]。图 6 显示了 Tape 9-Al-e-K 上 39 个激光发次的磁场幅值变化；脉冲能量为 (28.5 ± 0.3) J，脉冲持续时间为 (31 ± 2) fs。时域测量的最大和最小幅值

均保持稳定，这与相同发次中截止能量为 (10.68 ± 0.16) MeV 的可重复 TNSA 谱相符（见图 3）。甚高频波段的 EMP 谱在幅值谱中呈现出明显的峰值。峰值幅度围绕平均值的变化范围较小，表明模态结构具有良好的可重复性。

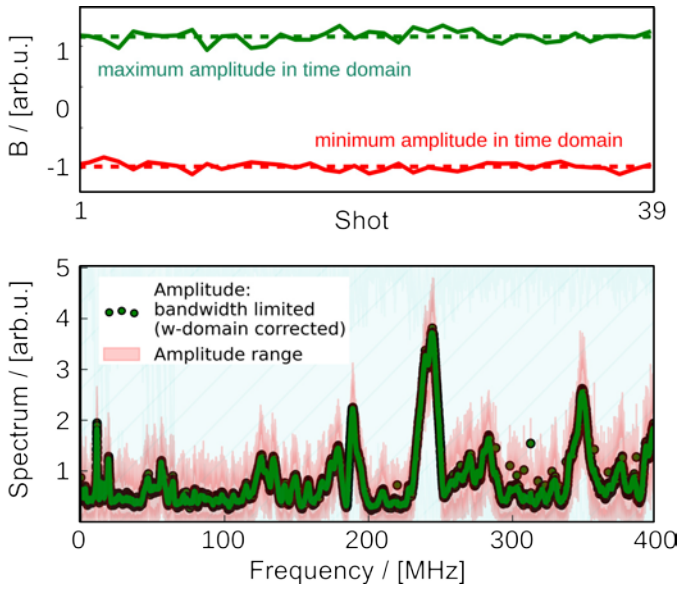

图 6。39 个发次的时域信号（上）以及时间积分平均幅度谱（下）的最大和最小磁场幅度；这些发次在 Tape 9-Al-e-K 上采用相同的激光参数，即 (28.5 ± 0.3) J 的脉冲能量和 (31 ± 2) fs 的脉冲持续时间。

图 7 对比了能量范围为 20 J 至 28 J、脉冲持续时间为 (31 ± 2) fs 的发次信号。标记为 (a) 的发次，其非零幅值明显低于标记为 (b) 的发次。请注意，我们在汤姆孙抛物线谱仪中未检测到 (a) 发次的质子信号，但检测到了 (b) 发次的质子信号。电场和磁场幅度对未对准十分敏感。无法确定 (a) 发次中束线的哪些部分未对准。未来的表征工作应着重进行统计分析，并根据不同的激光参数和实验装置布局绘制 EMP 幅度映射。

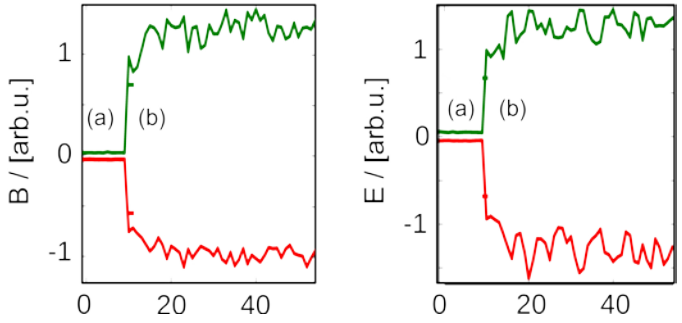

图 7。Tape 9-Al-e-K 上一次运行中各发次的时域信号最大和最小幅度：磁场（左）和电场（右）。脉冲能量和脉冲持续时间分别在 20 28 和 (31 ± 2) fs 范围内变化。发次 (a) 受到未对准的影响，而发次 (b) 显示出对激光参数的敏感性。

TaTaS-PW 系统为高重复频率质子加速提供了稳定的靶系统方案。然而，固体靶技术会因烧蚀产生大量碎屑。下文将通过研究不同的带材和几何形状，探讨相应的缓解策略。

3.2 结构化带材的研究

图 8 展示了在最佳压缩条件下，不同激光脉冲能量作用于 9 μm 厚铝材后形成的烧蚀孔。可以看到，激光通过蒸发作用在靶上打出一个孔。带材结构受到削弱，烧蚀区边缘发生卷曲，使孔径进一步增大。因此，在较低激光能量下，孔呈椭圆形，这可能是成像系统中的投影效应所致。在较高激光能量下，孔的形状明显偏离完美圆形。下文所称的孔尺寸，是指考虑卷曲效应后的烧蚀区尺寸。孔径是指与实际烧蚀区进行插值、使相应体积相等的圆的直径。

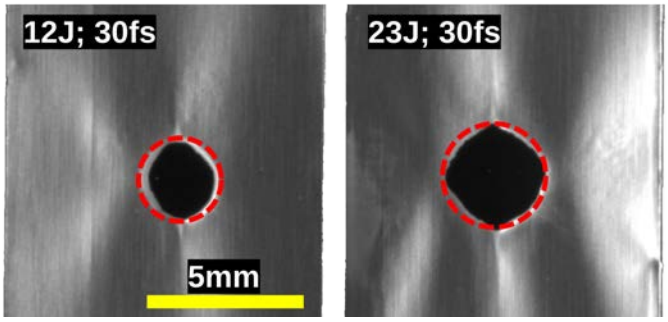

图 8。激光发次后，蒸发的靶材形成了 9 μm 厚铝带上的烧蚀孔：（左）为最佳压缩条件下 12 J 激光脉冲能量，（右）为最佳压缩条件下 23 J 激光脉冲能量。虚线表示完美圆形（右侧的圆大于左侧的圆）。

将烧蚀孔与一种模型进行比较，该模型假设激光加热的电子群传递给靶的全部热量都会驱动靶材蒸发，从而预测贯穿孔的尺寸 [24]。所有发次均在最佳焦点进行，我们在图 9 中以激光脉冲功率与孔径的关系比较实验结果和理论预测。对于激光脉冲被拉伸的情况，该模型无法预测孔径 [39]。在最佳压缩条件下进行的发次中，92 % 的数据对应的理论预测处于不确定度范围内。峰值功率适中的发次中，每发以≈400 TW 的功率蒸发 ≈0.172 mg 的铝。以 0.05 Hz 连续高重复频率运行，22.4 d 内将产生 1 kg 的铝碎屑。

本文研究了两种减少碎屑并控制烧蚀区域几何形状的策略：(i) 使用多层带材，将热量耗散到体积更大的低原子序数材料中；(ii) 使用微结构带材，限制电子在物质中往返流动的区域。两种靶均制成带状，但未在带靶系统中进行测试，而是压装在金属框架中，以便相对于激光焦点进行精确的独立对准。

第一种方法并不成功。与图 8 相比，图 10 显示单层带材和多层带材的孔径没有差异。铝的烧蚀量相同。塑料层中的孔似乎没有变化。各层可能未能良好连接，这一挑战可通过未来的实验加以解决。

结构化靶材证明能有效减少碎屑，见图11。结构化带材中的孔径仍小于非结构化胶带上的孔径。需要注意的是，结构化带材

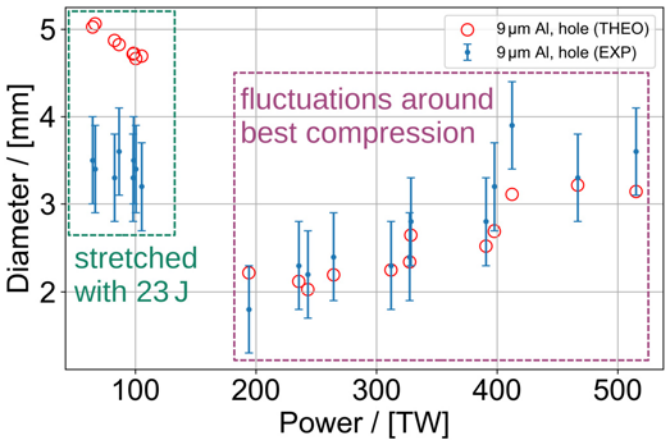

图 9。在最佳焦点处，激光脉冲功率变化条件下，9 µm 厚铝带上的蒸发孔直径；对比了实验结果（EXP）与理论预测（THEO）。其中突出显示了两组发次：（绿色）激光功率为 23 J、激光脉冲持续时间变化的一组；以及（紫色）最佳压缩附近、脉冲能量变化的一组。

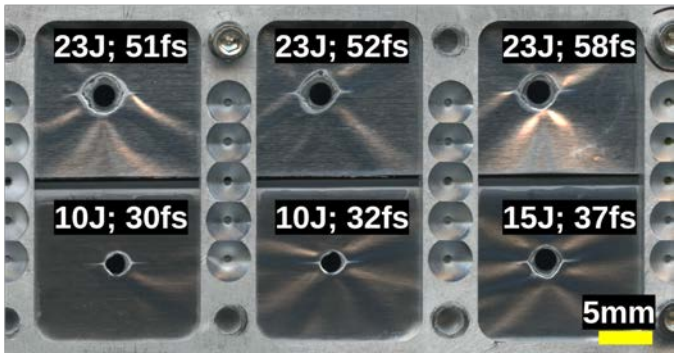

图 10。激光 shot 后，蒸发的靶材形成了 9 µm 厚铝带上的烧蚀孔；压合在铝材上的 125 µm 厚聚酯薄膜层未显示出明显的烧蚀迹象。

由厚度为 6 µm 的铝制成；如 [24] 所示，其孔预计比厚度为 9 µm 的铝制成的带材上的孔更大。结构化使烧蚀材料的量减少了 80 %。需要注意的是，微结构最近的边缘距激光相互作用点 300 µm，以确保靶法向鞘层加速机制不受干扰。

结构化可以精确控制材料发生烧蚀的区域。结构化带材中的圆孔保持完整，这可能有助于防止在使用厚度减小的更窄带材条带时带材发生断裂。之所以需要此类带材，是因为较宽的带材很容易遮挡侧视诊断的直接视线，例如用于研究等离子体和预等离子体动力学的探测光束、粒子束发射或汤姆孙散射。较薄的箔片不仅是实现 TNSA 所需的，也是实现离子加速的辐射压加速机制所需的。

4 结论

我们成功实现了一种带靶系统，为开展相对论激光与固体相互作用的高重复频率实验铺平了道路。本文报告了通过靶法向鞘层加速机制实现的稳定离子加速

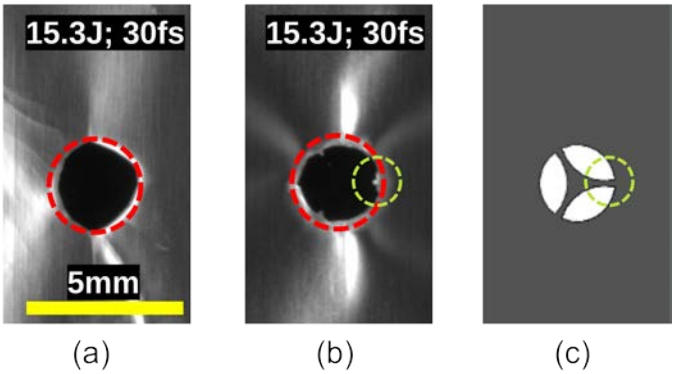

图 11. 激光发次后，靶材蒸发，在（a）厚度为 9 μm 的铝带和（b）厚度为 6 μm 的结构化铝带上留下烧蚀孔。两者的主要区别在于烧蚀材料的量；（c）结构化带材通过切除（白色）区域减少了烧蚀材料。红色圆圈大小相同。（c）中展示了微结构的设计，其方向与（b）中的相应结构一致。绿色圆圈标出（b）中激光发次后残留的一条微结构臂。

实验结果。该系统采用开放式几何结构和模块化配置，可根据特定实验装置进行调整。本文还介绍了一种利用微结构减少碎屑的新方法。

通过离子能谱和电磁脉冲幅度谱评估系统的稳定性。对于厚度为 9 μm 的 Kapton增强铝带，截止能量的发次间标准差为 1.5%。时域中的甚高频波段电磁脉冲幅度可用于检验相互作用的稳定性。当离子束应用于次级源时，后者的方法将变得更加重要，因为届时无法针对每一发检查质子能谱。

胶带相对于初始对准位置的机械稳定性为 (-15 ± 38) μm。请注意，VEGA-3 焦点的瑞利长度约为 130 μm。

固体密度靶会产生大量碎屑。在 CLPU 通常为期 18 周的年度开放时间内，若以最佳焦点、400 TW 的功率每天照射 6 小时，每 20 s 发次一次，则每次使用 9 μm 铝箔可产生 1 kg 碎屑。针对如此大量的碎屑，我们通过在胶带中引入微结构，展示了将碎屑减少 80 % 的效果。

利益冲突声明

作者声明，本研究是在不存在任何可能被视为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下开展的。

作者贡献

作者贡献如下：ME、DL、JA 对本研究贡献相同，并共同列为共同第一作者；ME 撰写了稿件初稿；DL、JA 撰写了稿件的部分章节；ME、DL、JH、RL 参与了研究的构思与设计；ME、JAP 完成了数据整理和分析；所有作者均参与了相关实验工作；所有作者均参与了稿件修订、阅读并批准了提交版本。

资金支持

本研究获得欧盟 Horizon 2020 研究与创新计划资助，资助渠道为欧盟 IMPULSE 项目（资助协议编号 871161），并获得 LASERLAB-EUROPE V 项目资助（资助协议编号 871124）。本研究还获得西班牙科学、创新与大学部通过 ICTS 设备资助（编号 EQC2018-005230-P）提供的经费，以及由 MCIN / AEI / 10.13039/501100011033 / FEDER、欧盟资助的项目 PID2021-125389OA-I00 提供的经费；此外，还获得了卡斯蒂利亚-莱昂自治区政府的 CLP263P20 和 CLP087U16 项目资助。

致谢

如果没有 CLPU 激光团队和工程团队的帮助，这项工作就不可能完成。特别感谢 CLPU 的车间。

数据可用性声明

支持本研究结论的原始数据和数值方法可在提出合理请求后向通讯作者获取。

参考文献

[1] T. H. Maiman 等人，《红宝石中的受激光辐射》，Nature 187（1966年），493-494。https://doi.org/10.1038/187493a0[2] M. DiDomenico 等人，通过对 YAIG:Nd 激光器锁模产生超短光脉冲，Applied Physics Letters 8, 7（1966年），180-183。https://doi.org/10.1063/1.1754544[3] P. Maine 等人，通过啁啾脉冲放大产生超高峰值功率脉冲，IEEE Journal of Quantum Electronics 24, 2（1988年）398-403。https://doi.org/10.1109/3.137[4] M. Aoyama 等人，0.85 PW、33 fs 钛宝石激光器，Optics Letters 28, 17（2003年），1594-1596。https://doi.org/10.1364/OL.28.001594[5] T. Tajima 和 V. Malka，激光等离子体加速器，Plasma Physics and Controlled Fusion 62, 034004 （2012年）。https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab6da4[6] J. Alvarez 等人，激光驱动中子源：特性、应用与前景，Physics Procedia 60（2014年），29-38。https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.11.006[7] J. A. Chakera 等人，用亚毫焦耳飞秒激光脉冲产生用于相位衬度成像的连续千赫兹 Cu Ka 光源，Applied Physics Letters 93, 261501（2008年）。https://doi.org/10.1063/1.3046727[8] M. Borghesi，离子加速：TNSA及其他，Springer Proceedings in Physics 231（2019年）。https://doi.org/10.1364/10.1007/978-3-030-25850-4 7[9] K. Nemoto 等人，激光触发的离子加速与桌面式同位素生产，Applied Physics Letters 78, 5（2001年）595-597。https://doi.org/10.1063/1.1343845[10] M. I. K. Santala 等人，通过强激光-等离子体相互作用产生的高能质子生产放射性核素，Applied Physics Letters 78, 1（2001年）19-21。https://doi.org/10.1063/1.1335849[11] F. E. Merrill 等人，FAIR上的质子显微术，AIP Conference Proceedings 1195, 1（2009年）667-670。https://doi.org/10.1063/1.3295228

[12] F. Mirani 等人，使用激光驱动粒子源进行综合定量PIXE分析和EDX能谱，Science Advances 7, 3（2021年）。https://doi.org/10.1126/sciadv.abc8660[13] M. Roth 等人，强激光加速质子束快速点火，Physical Review Letters 86, 3 2001 436 439 10 1103 86 436 ( ) - . https://doi.org/ . /PhysRevLett. .[14] S. Garcia 等人，连续生产薄带状固态氢，Laser and Particle Beams 32, 4（2014年），569-575。https://doi.org/10.1017/S0263034614000524[15] J. T. Morrison 等人，New Journal of Physics 20, 022001（2018年）。https://doi.org/10.1088/1367- 2630/aaa8d1[16] P. Puyuelo-Valdes 等人，在 CLPU 使用高功率激光实现一种能够高重复频率MeV范围质子加速的薄型平面水靶，Plasma Physics and Controlled Fusion 64, 054003（2022年）。https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac5643[17] P. McKenna 等人，多太瓦激光与固体相互作用在质子加速方面的表征，《科学仪器评论》73, 4176-4184（2002年）。https://doi.org/10.1063/1.1516855[18] T. Nayuki 等人，《科学仪器评论》74, 3293（2003年）。https://doi.org/10.1063/1.1578156[19] M. Noaman-ul-Haq 等人，《物理评论：加速器与束流》20, 041301（2017年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.041301[20] S. Raschke、S. Spickermann 等人，超短激光加速质子脉冲具有与传统质子束相似的DNA损伤效果，但产生的即时硝化氧化应激较轻，《科学报告》6, 32441（2016年）。https://doi.org/10.1038/srep32441 补充资料介绍了靶，见 S. Spickermann，《激光驱动离子束特性及医学应用剂量测量》，博士论文，杜塞尔多夫海因里希·海涅大学（2019年）。https://d-nb. info/119960724X/34 改进设计的视图见 J. Ehlert 等人，《AIP进展》11, 065208（2021年）。https://doi.org/10.1063/5.0031299[21] N. P. Dover 等人，展示通过超强激光与带状靶相互作用重复产生高能质子，《高能量密度物理学》37, 100847（2020年）。https://doi.org/10.1016/j.hedp.2020.100847[22] S. Steinke 等人，利用拍瓦激光脉冲加速具有消色差发散的高电荷离子束，《物理评论：加速器与束流》23, 021302（2020年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.02130[23] F. P. Condamine 等人，适用于PW级激光±与物质相互作用的高重复频率固体靶输送系统，Review of Scientific Instruments 90, 063504（2021年）。https://doi.org/10.1063/5.0053281[24] M. Ehret 等人，已投稿至《核仪器与方法B辑：物理研究》（2022年）。https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.14202[25] F. Consoli 等人，《高功率激光科学与工程》8, e22（2020年）。https://doi.org/10.1017/hpl.2020.13[26] A. PoyeÂ 等人，《物理评论E》98, 033201（2018年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.033201[27] M. Ehret 等人，甚高频波段电磁脉冲的模式控制，第48届EPS等离子体物理会议论文集，P5b.204（2022年）。https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.06082[28] L. Volpe 等人，《高功率激光科学与工程》7, e25（2019年）。https://doi.org/10.1017/hpl.2019.10[29] R.A. Snavely 等人，《物理评论快报》85, 14（2000年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.2945[30] S.C. Wilks 等人，《等离子体物理》8, 542（2001年）。https://doi.org/10.1063/1.1333697

[31] M. Roth 和 M. Schollmeier，Yellow Papers，CERN-2016-001（2016）。
https://doi.org/10.5170/CERN- 2016-001.231[32] Salgado-LoÂ pez 等人，IBIC会议论文集（2022）。doi:10.18429/JACoW-IBIC2022-TU3C2[33] J. I. Apin˜ aniz 和 M. Ehret，CLPU程序库（2022）。https://git.clpu.es/japinaniz/pyiossr（设施用户可访问）[34] M. Seimetz 等人，用于表征激光加速质子的飞行时间探测器，IEEE核科学研讨会暨医学成像会议（2013）。
https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2013.6829804[35] M. Ehret 等人，超短激光脉冲与近临界密度气体射流相互作用产生的离子加速，准备中（2020）。
https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.09455[36] J. Schreiber 等人，高强度激光脉冲驱动离子加速的解析模型，《物理评论快报》97，045005（2006）。
http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.045005[37] N. P. Dover 等人，小焦斑对超相对论激光-固体相互作用中电子加热和质子加速的影响，《物理评论快报》124，084802（2020）。
https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.084802[38] A. Debayle 等人，激光驱动相对论性电子束的发散，《物理评论E》82，036405（2010）。
http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.82.036405[39] F. Verluise 等人，利用声波对超短光脉冲进行任意色散控制，《美国光学学会杂志B辑》17，138-145（2000）。
https://doi.org/10.1364/JOSAB.17.000138