

基于带电粒子活化法开展的SGII-U皮秒激光质子加速实验研究

贺书凯 齐伟 矫金龙 董克攻 邓志刚 滕建 张博 张智猛 洪伟 张辉 沈百飞 谷渝秋

Picosecond laser-driven proton acceleration study of SGII-U device based on charged particle activation method

He Shu-Kai Qi Wei Jiao Jin-Long Dong Ke-Gong Deng Zhi-Gang Teng Jian Zhang Bo Zhang Zhi-Meng Hong Wei Zhang Hui Shen Bai-Fei Gu Yu-Qiu

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 225202 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181504

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181504>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2018/V67/I22>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[用于激光加速质子参数表征的带电粒子活化测谱技术](#)

Charged particle activation analysis for characterizing parameters of laser-accelerated protons

物理学报.2017, 66(20): 205201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.205201>

[激光与近相对论临界密度薄层相互作用产生大电量高能电子束](#)

High energetic electron bunches from laser--near critical density layer interaction

物理学报.2017, 66(7): 075203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.075203>

[低密等离子体通道中的非共振激光直接加速](#)

Non-resonant direct laser acceleration in underdense plasma channels

物理学报.2015, 64(14): 145201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.145201>

[激光脉冲形状对弓形波电子俘获的影响](#)

Effects of pulse temporal profile on electron bow-wave injection of electrons in laser-driven bubble acceleration

物理学报.2013, 62(20): 205203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.205203>

[实时离子探测器-----塑料闪烁体性能的实验研究](#)

Experimental studies of the characteristics of a real-time ion detector-plastic scintillator

物理学报.2012, 61(10): 105202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.105202>

# 基于带电粒子活化法开展的SGII-U皮秒激光质子加速实验研究\*

贺书凯<sup>1)†</sup> 齐伟<sup>1)</sup> 矫金龙<sup>1)</sup> 董克攻<sup>1)</sup> 邓志刚<sup>1)</sup> 滕建<sup>1)</sup> 张博<sup>1)</sup>  
张智猛<sup>1)</sup> 洪伟<sup>1)</sup> 张辉<sup>2)</sup> 沈百飞<sup>2)</sup> 谷渝秋<sup>1)3)4)</sup>

1) (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)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所强激光实验室, 上海 201800)

3) (上海交通大学, 聚变科学与应用协同创新中心, 上海 200240)

4) (北京大学应用物理与技术中心, 北京 100871)

(2018年8月8日收到; 2018年9月20日收到修改稿)

基于带电粒子活化测谱方法在SGII-U装置上开展了皮秒激光靶背鞘场机制质子加速实验研究, 对靶参数进行了优化. 利用带电粒子活化测谱方法测量了相同激光条件、不同Cu薄膜靶厚度情况下靶背鞘场加速质子的最高截止能量、角分布、总产额以及激光能量到质子的转化效率等关键参数. 实验发现, SGII-U皮秒激光靶背鞘场加速机制的最佳Cu薄膜靶厚度为10  $\mu\text{m}$ , 对应质子最高能量接近40 MeV, 质子( $>4$  MeV)总产额约 $4 \times 10^{12}$ 个, 激光能量到质子的转化效率约2%. 薄膜靶更厚或者更薄都会降低加速质子的最高截止能量; 当靶厚减薄至1  $\mu\text{m}$ 时, 皮秒激光的预脉冲开始对靶背鞘场产生显著影响, 质子最高截止能量急剧下降, 高能质子束斑呈现空心结构; 而当靶厚增加至35  $\mu\text{m}$ 时, 虽然质子束的能量有所降低, 但是质子束斑的均匀性更好.

**关键词:** 带电粒子活化, 激光质子源, 能量转化效率, 靶背鞘场加速

**PACS:** 52.38.Kd, 52.70.Nc, 29.40.-n, 82.80.Jp

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181504

## 1 引言

自1979年Tajima和Dawson<sup>[1]</sup>提出激光等离子体加速理论以来, 一种极具潜力、低成本、台面化的加速器新技术逐渐进入人们的视野. 受限于当时激光技术的发展, 直到2000年Snavely等<sup>[2]</sup>利用皮秒激光和固体靶作用获得了58 MeV的质子束之后, 激光离子加速才获得了更加广泛的关注, 大量的物理实验及粒子模拟(PIC)计算机模拟工作<sup>[3-10]</sup>不断开始涌现, 用以揭示激光离子加速的物理机制及规律. 随着研究的深入开展, 靶背鞘场加速(target normal sheath acceleration, TNSA)

机制成为最先被人们认知并了解的激光加速机制之一. 除此之外, 一些依赖于特殊激光条件的新型激光离子加速机制, 比如辐射压加速, 相对论自透明加速、无碰撞静电冲击波加速等也逐渐被提出<sup>[11-19]</sup>. 这些加速机制可以从某些方面改善TNSA加速机制的不足, 但是受限于激光器的硬件条件, 鲜有相关实验被开展.

根据最新的文献报道, Wagner等<sup>[20]</sup>基于TNSA加速机制获得了最高截止能量85 MeV的质子束, 高能质子数量达到了 $10^9$ 个. 这使得人们开始重新审视TNSA的加速潜力. 迄今为止, 从激光加速质子应用角度来看, TNSA依然是最稳定、最有效的加速机制. 激光驱动TNSA加速质子被广

\* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0401100)、科学挑战计划(批准号: TZ2018005)和国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2012YQ03014206)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shukai.he@caep.cn

泛应用于超快电磁场的质子分幅照相诊断、质子束荧光分析、激光快中子源的产生等. 从Wagner等的工作来看, TNSA加速的质子能量及数量尚存在一定的优化空间. 而对于参数一定的超短超强激光装置而言, TNSA加速质子的能量及转化效率等, 一般存在最佳的靶厚条件. 了解这些信息, 有助于更好地利用现有的激光器条件, 开展一些以TNSA质子加速为基础的应用工作, 比如惯性约束聚变动理学过程的质子照相研究<sup>[21]</sup>、超快激光中子源的产生、激光核物理研究等, 这是一件十分重要和有意义的课题.

本文采用带电粒子活化测谱技术, 针对SGII-U装置第九路皮秒激光的现有条件, 开展了激光驱动TNSA质子加速靶参数优化实验研究. 改变Cu薄膜靶的厚度, 测量不同靶厚条件下TNSA质子加速的能量、质子束斑分布及激光能量到质子的转化效率等, 给出了这些参数随靶厚度的变化关系, 给出了TNSA质子加速的最佳Cu靶厚度为10 μm. 随着Cu薄膜靶厚度的增加, 质子最高截止能量有所下降, 但是质子束斑变得更加均匀. 而当Cu薄膜厚度减薄为1 μm时, 质子束斑有明显的调制结构, 高能质子束斑呈现空心结构.

## 2 带电粒子活化测谱方法

为测量激光加速质子的空间积分能谱、激光能量到质子的转化效率等关键参数, 基于传统

的带电粒子活化分析技术和放射性活度符合测量技术发展了一套带电粒子活化测谱装置, 并建立了解谱方法<sup>[22]</sup>, 该装置的核心为两个规格为Φ75 mm × 75 mm的NaI核辐射探测器. 实验过程中采用如图1所示的滤片堆栈诊断结构, 当连续能谱的质子入射到依次排列的含有活化体材料(比如Cu)的滤片堆栈中时, 质子会在活化体材料中引起特定的核反应产生放射性核素, 通过测量活化体中放射性核素的活度即可反推入射质子的能谱信息. 用作活化体的材料选择自然丰度的Cu, 包含69.15%的<sup>63</sup>Cu以及30.85%的<sup>65</sup>Cu两种核素, 利用到的核反应道主要是<sup>63</sup>Cu(p,n)<sup>63</sup>Zn, 反应阈值4 MeV. 图2给出了其反应截面随质子能量的变化关系, 反应截面最高约500 mbar<sup>[23]</sup>, 反应生成具有β<sup>+</sup>衰变特性的放射性核素<sup>63</sup>Zn. 将活化后的Cu片放置在放射性活度符合测量仪的两个NaI探头之间, <sup>63</sup>Zn衰变产生的β<sup>+</sup>在材料中发生湮灭后放出两个反向发射的、能量为0.511 MeV的γ光子, 这一对光子被两端的NaI探测器接收产生两个脉冲信号, 每个信号分为两路, 进入核电子学电路, 通过输出信号的时间符合和幅度(能量)符合来对核辐射事件进行记录. 利用该装置可以完成放射性核素能谱、活度、半衰期等参数的测量. 使用活度1 μCi的<sup>22</sup>Na正电子源对整个系统的β<sup>+</sup>探测效率进行了标定.

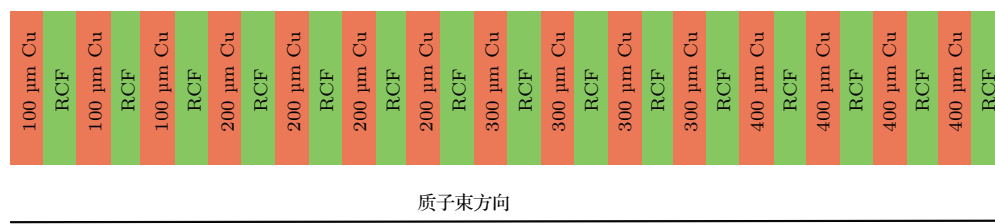


图1 带电粒子活化测谱诊断布局  
Fig. 1. The sketch of charged particle activation diagnostics.

上述方法已经在XG-III装置开展的实验中得到了有效应用<sup>[22]</sup>. 考虑到SGII-U和XG-III的激光器能量差别较大, TNSA加速质子最高截止能量亦存在差别. XG-III质子最高截止能量在20 MeV左右, SGII-U最高质子能量可以达到50 MeV. 高质子能量情况下许多阈值高的核反应道被激发, 产生的放射性核素可能会干扰测量, 从而带来误差.

为了判断SGII-U装置上TNSA加速质子轰击活化体Cu滤片产生的放射性核素的种类, 取实验中滤片堆栈的第1片活化Cu片, 利用放射性活度符合测量仪测量其衰变曲线. 测量时间尽可能长, 以保证对长寿命核素的有效测量. 图3黑色曲线为测量结果, 从衰变曲线可以看出Cu片中明显产生了两种半衰期的放射性核素. 通过拟合可以得到两种

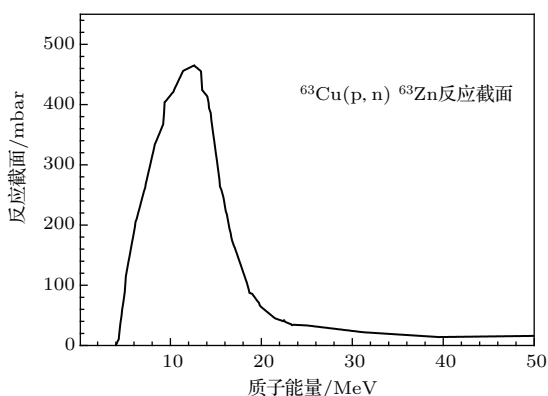


图2  $^{63}\text{Cu}(\text{p}, \text{n})^{63}\text{Zn}$  反应截面曲线 [23]  
Fig. 2. Cross section of  $^{63}\text{Cu}(\text{p}, \text{n})^{63}\text{Zn}$  reaction.

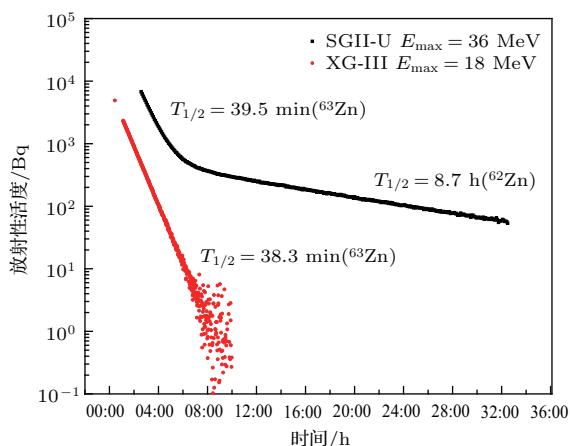


图3 最高截止能量不同的TNSA质子轰击Cu片产生的放射性核素衰变曲线  
Fig. 3. Half-life curve of radionuclides produced by different energy proton activated copper.

放射性核素的半衰期为39.5 min和8.7 h, 对应的两种放射性核素分别为 $^{63}\text{Zn}$ 和 $^{62}\text{Zn}$ . 测量得到的 $^{63}\text{Zn}$ 的半衰期略大于真实值, $^{62}\text{Zn}$ 的半衰期则稍小于真实值. 主要原因在于两种同时存在的放射性核素的相互影响. 拟合测量刚开始一段时间内的半衰期曲线,可以得到短寿命核素 $^{63}\text{Zn}$ 的半衰期,少量来自 $^{62}\text{Zn}$ 的衰变信号会使得拟合得到的 $^{63}\text{Zn}$ 半衰期变长;随着测量时间的延长,短寿命的 $^{63}\text{Zn}$ 几乎全部衰变成稳定核素,这时候测量信号主要来自长寿命的 $^{62}\text{Zn}$ ,因此拟合后半段的衰变曲线即得到长寿命核素 $^{62}\text{Zn}$ 的半衰期. 同样,少量来自未衰变完的 $^{63}\text{Zn}$ 的信号则会减小拟合得到的 $^{62}\text{Zn}$ 半衰期. $^{62}\text{Zn}$ 产生的原因在于质子能量提高后,激发了核反应道 $^{63}\text{Cu}(\text{p}, 2\text{n})^{62}\text{Zn}$ ,此核反应的反应阈值为13 MeV,而该实验发次的质子最高截止能量为36 MeV;图3红色曲线为XG-III装置某一次次的实验测量结果,该发次对应的最高质子截止能量为

18 MeV,可以看出活化Cu片产生的放射性核素只有 $^{63}\text{Zn}$ . 由于 $^{62}\text{Zn}$ 也具有 $\beta^+$ 衰变特性,其衰变信号也会被符合测量仪测到.所幸和 $^{63}\text{Zn}$ 相比, $^{62}\text{Zn}$ 半衰期很长,则在打靶完成至测量结束的约1.5 h内,衰变信号主要来自 $^{63}\text{Zn}$ , $^{62}\text{Zn}$ 产生的衰变信号可以忽略不计,这从图3黑色曲线可以明显看出.所以该方法针对SGII-U装置产生的更高能量的质子能谱测量来说依旧是适用的.

### 3 实验

实验在SGII-U装置上开展,该装置位于中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室,可同时输出八路纳秒激光和一路皮秒激光.皮秒激光波长1053 nm,可提供的最高输出能量达1 kJ.本轮实验,皮秒激光能量380 J,脉宽1.6 ps,经由 $F = 2.5$ 的离轴抛物面镜聚焦后,可获得 $4 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 的激光功率密度(光学焦斑的HWHM值为20  $\mu\text{m}$ ,能量集中度50%).主脉冲80 ps以远对比度约 $10^{-8}$ .维持激光参数不变,以p极化 $21^\circ$ 入射到Cu薄膜靶表面.改变Cu薄膜的厚度,厚度的变化范围1—35  $\mu\text{m}$ ,利用带电粒子活化测谱法对不同Cu薄膜厚度的TNSA质子加速参数进行测量.实验中用到的主要诊断是由不同厚度活化Cu片和辐射变色膜片(radiochromic dosimetry film, RCF)组成的滤片堆栈.测谱下限为4 MeV,主要由活化反应的阈值决定;质子测谱上限为52 MeV,由滤片的厚度决定.堆栈主要结构如图1所示,用到了15片不同厚度的Cu片及15片Ashland公司生产的型号为HD-V2的RCF,RCF厚度为105  $\mu\text{m}$ ,主要由8  $\mu\text{m}$ 厚的灵敏层和97  $\mu\text{m}$ 厚的基底构成.质子入射到RCF的灵敏层上会导致其针对某些波长的光学透过率发生变化,利用扫描仪或者光密度计进行测量后,可获得质子的定量信息,也可以从视觉上的颜色变化获得质子束斑等直观的信息.Cu片的结构为3层100  $\mu\text{m}$ ,4层200  $\mu\text{m}$ ,4层300  $\mu\text{m}$ ,4层400  $\mu\text{m}$ ,沿着质子束发射方向依次放置,中间间隔以RCF.滤片大小为5 cm  $\times$  5 cm,滤片距离固体靶的距离为5 cm,基本可以覆盖整个质子束斑,以测量质子束的总产额.在滤片中心钻直径2 mm的圆孔,可以透过一部分质子作为汤姆逊离子谱仪的诊断孔(图中未给出).每次实验结束后,利用放射性活度符合测量仪

依次测量各个Cu片的放射性活度, 每片测量时间180 s. 记录测量时刻, 然后按照半衰期计算各Cu片打靶时刻的放射性活度, 将该活度值作为输入条件输入到带电粒子活化解谱程序即得到质子的空间积分能谱. 符合测量完成后, 将活化Cu片放置在成像板上(imaging plate, IP), 活化Cu片的活性区发射的 $\gamma$ 光子可以使IP感光, 通过记录其自发光图像可以近似得到质子束斑分布.

#### 4 结果与讨论

实验中TNSA加速质子的最高截止能量可以通过汤姆孙离子谱仪给出, 亦可通过RCF或者活化Cu片在IP上的成像结果直观、简洁地呈现. 从实验测量结果看, 三者的结果基本一致. 图4给出了不同Cu薄膜靶厚度下TNSA加速质子的RCF测量结果. 每片RCF标称的质子的能量主要通过SRIM程序计算得到. 一定能量的入射质子在穿过诊断用滤片堆的过程中, 由于受到Cu, RCF等物质的阻止作用(主要包括核阻止和电子阻止), 能量不断衰减. 在其射程的末端, 存在一个能量急剧衰减的过程, 对应的能损曲线存在一个峰结构, 称为Bragg峰. 质子的大部分能量都会衰减在Bragg峰内. 如果Bragg峰刚好位于某一层RCF的灵敏层内, 则其大部分能量就会沉积于此, 引起该片RCF辐射变色量也最可观. 一般认为该层RCF记录的质子能量即为Bragg峰刚好位于该层RCF灵敏层的入射质子的能量. 图4红色曲线标出了质子的最

高截止能量对应的RCF层, 红色曲线左侧为质子信号. 曲线右侧RCF上依然有辐射剂量引起的变色, 分析认为该变色并不是由于质子辐照引起的, 而是由靶背出射的超热电子引起的辐射变色. 考虑到质子可以诱导核反应的产生, 而电子几乎不引起核反应, 我们将15  $\mu\text{m}$ 靶厚实验发次的RCF结果和活化Cu片的IP成像结果进行了比较, 如图5所示. 图5(a) RCF上红色虚线圆圈标出的辐射变色信号在活化Cu片上并未看到对应的活化信号, 可以判断该信号并不是由质子产生的, 而可能是由超热电子引起的. 另一个判断的依据是质子束在RCF记录介质上呈现的束斑轮廓随质子能量增加存在明显的变小, 而电子束引起的RCF辐射变色, 束斑轮廓一般比较均匀, 并且束斑变化比较小.

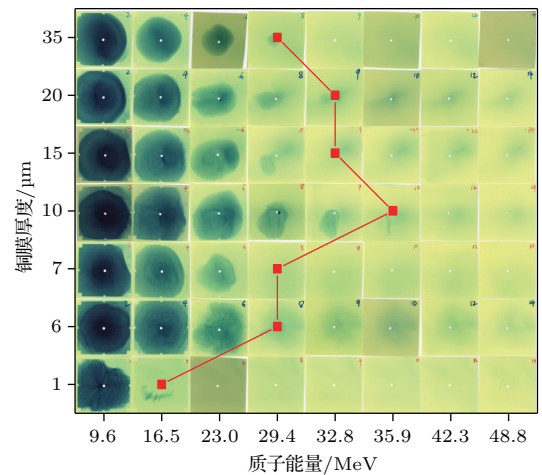


图4 不同Cu薄膜靶厚度下质子加速的RCF测量结果  
Fig. 4. RCF results of proton acceleration at different copper film thickness.

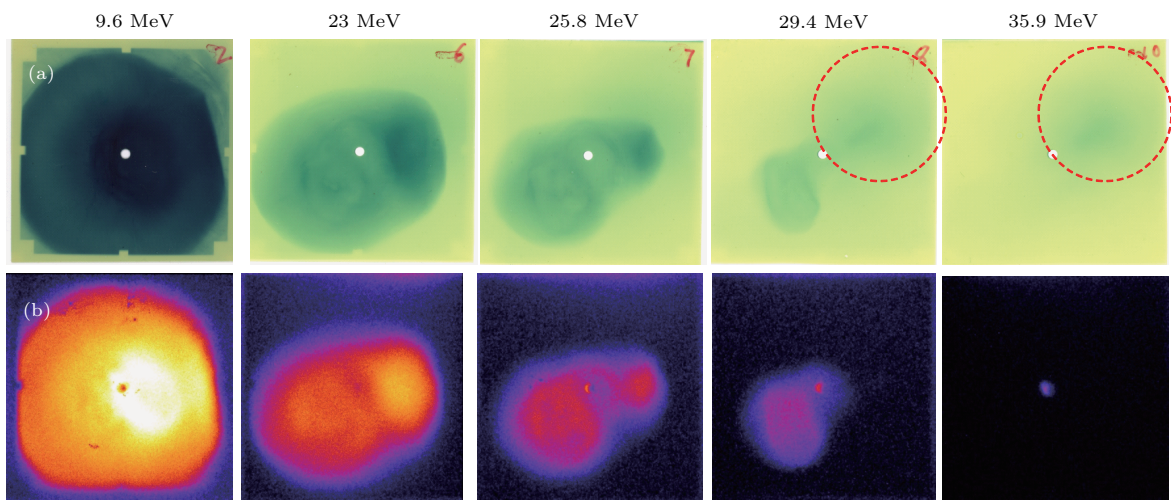


图5 靶厚15  $\mu\text{m}$ 发次质子束斑结果 (a) RCF测量结果; (b) Cu活化测量结果

Fig. 5. Profiles of proton beam obtained from a shot on a 15  $\mu\text{m}$  thick copper film: (a) RCF results; (b) from measurement of the copper activation.

从图4红色曲线可以看到, 随着Cu薄膜靶厚度的增加, TNSA质子加速最高截止能量呈现先增加后减小的趋势, 靶厚10 μm时, 质子能量最高约为36 MeV, 靶厚增至35 μm时, 质子能量有所下降, 但是质子束斑变得更加均匀, 这是比较好理解的, 靶厚的增加削减了激光预脉冲对靶背的影响, 靶背鞘场变得比较均匀, 但同时靶厚的增加也降低了输运到靶背参与鞘场产生的超热电子的能量和数量, 从而降低了靶背鞘场的强度, 引起质子能量下降. 同样, 当靶减薄时, 在激光预脉冲影响下, 靶背等离子体标长增加, 引起加速鞘场强度的降低, 导致质子最高截止能量降低. 特别地, 当靶厚为1 μm时, 质子束的最高截止能量变化比较明显. 从6 μm时的30 MeV, 降至16 MeV, 且低能质子束斑开始出现放射状调制, 类似车辐条状, 高能质子出现空心结构. 分析认为该空心结构主要是由激光的预脉冲导致的. 图6(a)给出了1 μm靶时, 靶前

的X光针孔相机拍摄到的靶前X光发光图像, 可以看到明显的空心X光斑. 图6(b)给出的是活化Cu测量的质子束斑形状, 可以看到高能端存在明显的空心结构, 和RCF测量结果一致. 通过对SGII-U皮秒激光对比度测量, 主脉冲80 ps以远对比度为 $10^{-8}$ , 分析认为这样的对比度决定了TNSA质子加速薄膜靶厚度的下限. 在1 μm厚Cu薄膜靶情况下, 主脉冲到来时, 靶中心区域在预脉冲的烧蚀作用下已经遭到局部破坏, 使得靶前X光针孔相机及靶后质子束斑测量均呈现空心结构. 若想进一步提高TNSA质子加速的能量, 需要使用等离子体镜等进一步提高激光的对比度参数.

图7(a)给出了不同Cu薄膜靶厚度TNSA产生的质子束在各层活化Cu片中诱导产生的放射性核素 $^{63}\text{Zn}$ 的数量, 图7(b)是根据活度测量结果反推得到的质子能谱. 其中质子产额的误差主要来自活度测量过程中引入的误差, 能量误差主要取决于

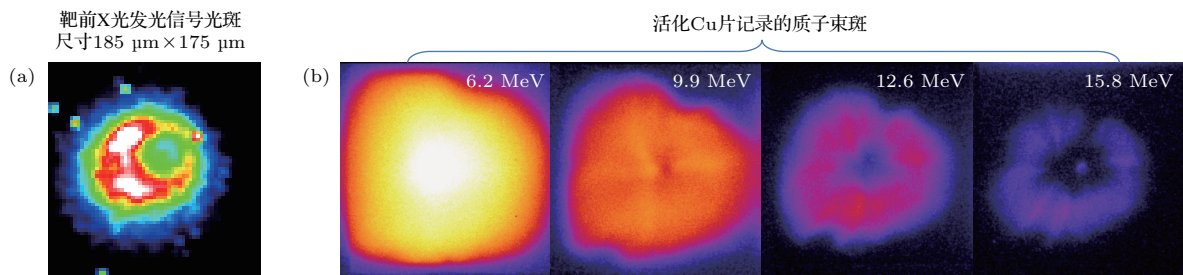


图6 1 μm靶厚测量到的(a)靶前X光焦斑, (b)活化Cu测量到的质子束斑形状

Fig. 6. (a) X-ray spot measured from the front target and (b) proton beam profile obtained from activated copper when 1 μm thick copper film was selected.

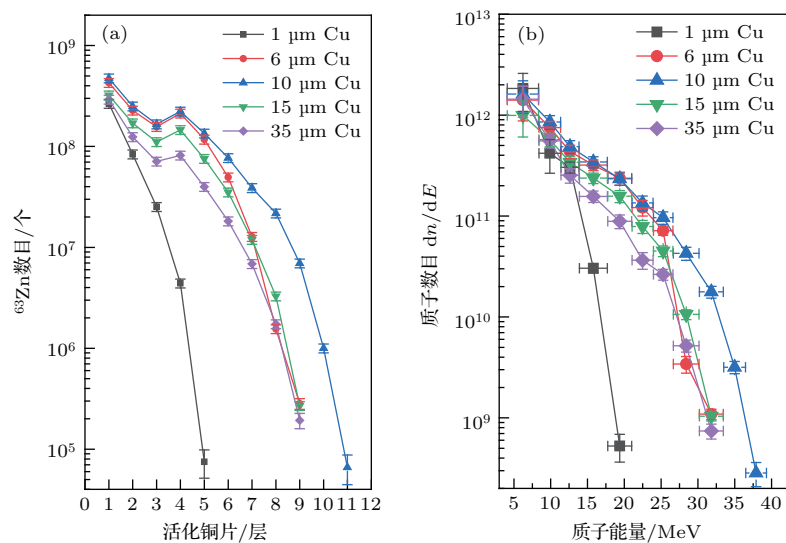


图7 (a)不同薄膜靶厚度质子在多层活化Cu诱导产生的 $^{63}\text{Zn}$ 数目; (b)通过活化测量反推得到的质子能谱

Fig. 7. (a) The number of  $^{63}\text{Zn}$  produced by proton activated copper layers for different copper film thickness; (b) the proton spectrum of laser-driven proton unfolded with the number of  $^{63}\text{Zn}$ .

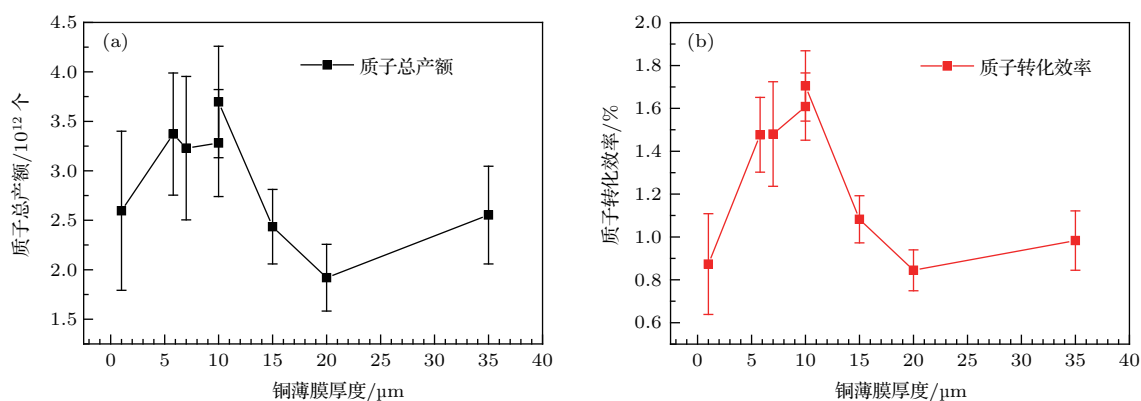


图 8 (a) 质子总产额随薄膜靶厚度的变化; (b) 质子转化效率随薄膜靶的变化

Fig. 8. (a) Total yield and (b) laser-proton conversion efficiency as a function of copper film thickness.

滤片的厚度及层数. 不同于汤姆孙离子谱仪只能测量很小立体角内的质子能谱, 带电粒子活化法给出的质子能谱为覆盖整个质子束出射立体角的空间积分能谱, 因此直接将能谱沿能量维积分就可以得到 TNSA 加速质子的总产额, 也就得到了激光能量到质子 (大于 4 MeV) 的能量转化效率. 图 8(a) 给出了激光加速质子总产额随 Cu 薄膜靶厚度的变化曲线, 图 8(b) 则给出了激光能量到质子的转化效率随 Cu 薄膜靶厚度的变化关系, 其变化趋势和图 4 给出的质子最高截止能量随厚度的变化趋势一致. 当靶厚 1  $\mu\text{m}$  时, 大于 4 MeV 的质子总产额  $2.5 \times 10^{12}$  个, 转化效率为 0.8%. 靶厚 10  $\mu\text{m}$  为最优, 对应质子产额和能量转化效率分别为  $3.5 \times 10^{12}$  及 1.6%. 当靶厚大于 10  $\mu\text{m}$  时, 能量转化效率减小, 但随靶厚增加变化趋势有所放缓.

## 5 结 论

本文基于带电粒子活化测谱方法对 SGII-U 皮秒激光 TNSA 质子加速进行了系统研究和参数优化. 测量了不同厚度 Cu 薄膜靶情况下的质子加速空间积分能谱、角分布及激光-质子转化效率等关键参数. 实验发现, 针对现有的 SGII-U 激光对比度及功率密度条件, 当靶厚 10  $\mu\text{m}$  时, 可获得最优的质子加速结果, 最高能量接近 40 MeV (进一步提高激光能量情况下获得过 50 MeV 的质子), 大于 4 MeV 质子总产额可达  $3.5 \times 10^{12}$  个, 激光到质子的能量转化效率接近 2%. 当靶厚为 1  $\mu\text{m}$  时, 预脉冲对加速影响明显, 质子最高截止能量及转化效率均有明显下降, 质子束均匀性变差, 有明显的调制

结构, 高能端有明显的空心结构. 根据我们的实验结果, 当采用 SGII-U 皮秒激光产生质子作为背光源进行质子分幅照相时, 可以选择厚一点的 Cu 薄膜靶, 质子束更加均匀, 靶太薄了质子束均匀性较差, 且存在一定的调制结构, 会给照相结果造成干扰; 当利用 SGII-U 皮秒束产生的质子通过束-靶作用产生激光中子源时, 则需要更高的质子能量和产额, 选用 10  $\mu\text{m}$  为宜. 进一步提高 SGII-U 皮秒激光的 TNSA 加速质子能量及数量则需要激光对比度的进一步改善和提高.

感谢中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室华能、任磊等激光运行人员在实验上给予的大力支持.

## 参考文献

- [1] Tajima T, Dawson J M 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 267
- [2] Snavely R A, Key M H, Hatchett S P, Cowan T E, Roth M, Phillips T W, Stoyer M A, Henry E A, Sangster T C, Singh M S, Wilks S C, MacKinnon A, Offenberger A, Pennington D M, Yasuike K, Langdon A B, Lasinski B F, Johnson J, Perry M D, Campbell E M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2945
- [3] Daido H, Nishiuchi M, Pirozhkov A S 2012 *Rep. Prog. Phys.* **75** 056401
- [4] Roth M, Cowan T E, Gauthier J C, Vehn J M, Allen M, Audebert P, Blazevic A, Fuchs J, Geissel M, Hegelich M, Karsch S, Pukhov A, Schlegel T 2002 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **5** 061301
- [5] Roth M, Brambrink E, Audebert P, Basko M, Blazevic A, Clarke R, Cobble J, Cowan T E, Fernandez J, Fuchs J, Hegelich M, Ledingham K, Logan B G, Neely D, Ruhl H, Schollmeier M 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** B841

- [6] Wilks S C, Langdon A B, Cowan T E, Roth M, Singh M, Hatchett S, Key M H, Pennington D, Mackinnon A, Snavely R A 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2
- [7] Ceccotti T, Levy A, Popescu H, Reau F, Oliveira P D, Monot P, Geindre J P, Lefebvre E, Martin P 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 185002
- [8] Robson L, Simpson P T, Clarke R J, Ledingham K W D, Lindau F, Lundh O, McCanny T, Mora P, Neely D, Wahlstrom C G, Zepf M, McKenna P 2007 *Nature Phys.* **3** 58
- [9] Cowan T E, Fuchs J, Ruhl H, Kemp A, Audebert P, Roth M, Stephens R, Barton I, Blazevic A, Brambrink E, Cobble J, Fernandez J, Gauthier J C, Geissel M, Hegelich M, Kaae J, Karsch S, LeSage G P, Letzring S, Manclossi M, Meyroneinc S, Newkirk A, Pepin H, Renard-LeGalloudec N 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 204801
- [10] Patel P K, Mackinnon A J, Key M H, Cowan T E, Ford M E, Allen M, Price D F, Ruhl H, Springer P T, Stephens R 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 125004
- [11] Yin L, Albright B J, Bowers K J, Jung D, Fernandez J C, Hegelich B M 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 045003
- [12] Yin L, Albright B J, Jung D, Shah R C, Palaniyappan S, Bowers K J, Henig A, Fernandez J C, Hegelich B M 2011 *Phys. Plasmas* **18** 063103
- [13] Yin L, Albright B J, Hegelich B M, Fernandez J C 2006 *Laser and Particle Beams* **24** 291
- [14] Jung D, Yin L, Gautier D C, Wu H C, Letzring S 2013 *Phys. Plasmas* **20** 083103
- [15] Yan X Q, Lin C, Sheng Z M, Guo Z Y, Liu B C, Lu Y R, Fang J X, Chen J E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 175003
- [16] Esirkepov T Z, Borghesi M, Bulanov S V, Mourou G, Tajima T 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 175003
- [17] Klimo O, Psikal J, Limpouch J, Tikhonchuk V T 2008 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **11** 031301
- [18] Jiao J L, He S K, Deng Z G, Lu F, Zhang Y, Yang L, Zhang F Q, Dong K G, Wang S Y, Zhang B, Teng J, Hong W, Gu Y Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 085201 (in Chinese) [矫金龙, 贺书凯, 邓志刚, 卢峰, 张镜, 杨雷, 张发强, 董克攻, 王少义, 张博, 滕建, 洪伟, 谷渝秋 2017 物理学报 **66** 085201]
- [19] Zhang H, Shen B F, Wang W P, Xu Y, Liu Y Q, Liang X Y, Leng Y X, Li R X, Yan X Q, Chen J E, Xu Z Z 2015 *Phys. Plasmas* **22** 013113
- [20] Wagner F, Deppert O, Brabetz C, Fiala P, Kleinschmidt A, Poth P, Schanz V A, Tebartz A, Zielbauer B, Roth M, Stohlker T, Bagnoud V 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 205002
- [21] Shan L Q, Cai H B, Zhang W S, Tang Q, Zhang F, Song Z F, Bi B, Ge F J, Chen J B, Liu D X, Wang W W, Yang Z H, Qi W, Tian C, Yuan Z Q, Zhang B, Yang L, Jiao J L, Cui B, Zhou W M, Cao L F, Zhou C T, Gu Y Q, Zhang B H, Zhu S P, He X T 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 195001
- [22] He S K, Liu D X, Jiao J L, Deng Z G, Teng J, Zhang B, Zhang Z M, Hong W, Gu Y Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 205201 (in Chinese) [贺书凯, 刘东晓, 矫金龙, 邓志刚, 滕建, 张博, 张智猛, 洪伟, 谷渝秋 2017 物理学报 **66** 205201]
- [23] Meadows J W 1953 *Phys. Rev.* **91** 885



# Picosecond laser-driven proton acceleration study of SGII-U device based on charged particle activation method\*

He Shu-Kai<sup>1)†</sup> Qi Wei<sup>1)</sup> Jiao Jin-Long<sup>1)</sup> Dong Ke-Gong<sup>1)</sup> Deng Zhi-Gang<sup>1)</sup> Teng Jian<sup>1)</sup>  
Zhang Bo<sup>1)</sup> Zhang Zhi-Meng<sup>1)</sup> Hong Wei<sup>1)</sup> Zhang Hui<sup>2)</sup> Shen Bai-Fei<sup>2)</sup> Gu Yu-Qiu<sup>1)3)4)</sup>

1) (*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

3) (*Shanghai Jiao Tong University, International Fusion Sciences and Applications (IFSA) Collaborative Innovation Center, Shanghai 200240, China*)

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

( Received 8 August 2018; revised manuscript received 20 September 2018 )

## Abstract

The laser-driven proton acceleration experiment is carried out on the SGII-U device based on charged particle activation method, and the target parameters are optimized. The charged particle method is used to measure the maximum cutoff energy of proton, angular profile, total yield and conversion efficiency of laser energy to proton energy for different copper film thickness under the same laser condition. It is found that the optimal copper film thickness for the SGII-U picosecond laser-driven proton experiment is 10  $\mu\text{m}$ , the highest proton energy obtained is about 40 MeV, and the total yield of protons ( $>4$  MeV) is about  $4 \times 10^{12}$ , the conversion efficiency of laser energy to proton energy is about 2%. Thicker or thinner copper film can reduce the maximum cut-off energy of accelerated proton; when the target thickness is reduced to 1  $\mu\text{m}$ , the pre-pulse of the laser begins to have a significant effect on the target normal sheath acceleration (TNSA) proton, proton energy drops sharply, the proton beam profile exhibits a hollow structure; when the target thickness is increased to 35  $\mu\text{m}$ , although the energy of the proton is reduced, the proton beam spot is more uniform. According to our experimental results, when using SGII-U picosecond laser to generate protons as a backlight diagnostics, a thicker Cu film can be selected which can supply more uniform proton beams. When the target is too thin, the TNSA proton itself has a modulation structure which will cause interference to yield the photographic results; when the protons generated by the SGII-U picosecond are used to generate neutron source, the higher proton energy and yield are required, and 10  $\mu\text{m}$  Cu film is suitable. The further enhancing the TNSA accelerated proton energy and quantity of the SGII-U picosecond laser requires the further improving of the laser contrast.

**Keywords:** charged particle activation analysis, laser-driven proton source, laser-proton conversion efficiency, target normal sheath acceleration

**PACS:** 52.38.Kd, 52.70.Nc, 29.40.-n, 82.80.Jp

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181504

\* Project supported by the National Key Programme for Science and Technology Research and Development, China (Grant No. 2016YFA0401100), the Science Challenge Project, China (Grant No. TZ2018005), and the National Grand Instrument Project, China (Grant No. 2012YQ03014206).

† Corresponding author. E-mail: [shukai.he@caep.cn](mailto:shukai.he@caep.cn)