

用于激光加速质子参数表征的带电粒子活化测谱技术

贺书凯 刘东晓 矫金龙 邓志刚 滕建 张博 张智猛 洪伟 谷渝秋

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

He Shu-Kai Liu Dong-Xiao Jiao Jin-Long Deng Zhi-Gang Teng Jian Zhang Bo Zhang Zhi-Meng
Hong Wei Gu Yu-Qiu

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 205201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.205201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.205201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

[Origin of energetic carbon ions with different charge states in ultrashort laser-thin foil interactions](#)

物理学报.2013, 62(16): 165201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.165201>

激光脉冲的横向波形对弓形波电子俘获的影响

[Effects of pulse transverse profile on electron bow-wave injection of electrons in laser wakefield acceleration](#)

物理学报.2013, 62(12): 125205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.125205>

用于激光加速质子参数表征的 带电粒子活化测谱技术*

贺书凯¹⁾ 刘东晓¹⁾ 矫金龙¹⁾ 邓志刚¹⁾ 滕建¹⁾ 张博¹⁾ 张智猛¹⁾
洪伟^{1)†} 谷渝秋¹⁾²⁾³⁾

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)(上海交通大学, 聚变科学与应用协同创新中心, 上海 200240)

3)(北京大学应用物理与技术中心, 北京 100871)

(2017年5月8日收到; 2017年7月18日收到修改稿)

基于传统带电粒子活化分析技术, 发展了一种用于激光加速质子参数表征的带电粒子活化测谱方法. 激光加速质子轰击不同厚度铜薄膜组成的诊断滤片堆栈, 使铜片活化, 通过测量各铜片活度及活性区的大小, 获得加速质子的空间积分能谱、角分布等参数. 详细讨论了活化测谱的滤片堆栈诊断排布、符合测量及解谱方法, 并对该方法的可靠性进行了自洽检验; 在XG-III皮秒激光装置上开展了带电粒子活化测谱实验, 利用该诊断方法, 得到了加速质子的角分布、空间积分能谱等参数, 实验获得的质子最高截止能量18 MeV, 激光能量到质子(>4 MeV)的转换效率为1.07%.

关键词: 带电粒子活化, 激光质子加速, 符合测量, 解谱

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

DOI: 10.7498/aps.66.205201

1 引言

激光加速器的加速电场可达 MeV/ μm , 传统射频加速器的加速电场仅为 MeV/m, 加速梯度的巨大优势可以大大减小加速器的空间尺寸, 降低建造成本, 为小型化、低成本加速器的发展指明了方向. 自1979年 Tajima 和 Dawson^[1] 提出激光等离子体加速理论以来, 这项技术得到了飞速发展, 在实验上已经可以稳定获得 MeV 到 GeV 量级的质子、电子、光子等粒子束^[2,3], 其能量足以诱导产生各种各样的核反应. 20世纪90年代末, 英、美的科研工作者在大型激光装置 VULCAN 和 NOVA 上相继实现了用激光诱导产生的 γ 光子将 ^{238}U 裂变^[4,5], 这是国际上首次利用超短超强激光技术进行的核反

应实验, 实验的理论预言最早是在1988年由 Boyer 等^[6] 提出. 随后, 科研工作者利用台面型的重频激光器也成功地进行了类似的实验^[7], 从而将利用激光技术研究核物理的工作又向前推进了一步, 并逐渐产生了“激光核物理”这一前沿交叉学科^[8,9]. 基于核反应的产生, 强激光粒子束在核数据的测量、激光中子源的产生、医学同位素的生产、放射性核废料的处理等方面均具有潜在的应用^[10-12]. 另一方面, 激光核物理也带动了核分析及核诊断技术的发展, 其中就包括活化分析技术.

传统意义上的带电粒子活化分析技术是指具有一定能量的带电粒子与原子核发生核反应产生放射性核素, 通过测量放射性核素的半衰期和活度, 确定样品中痕量元素的种类和数量, 是一种材料分析手段^[13]. 本文讨论的带电粒子活化测谱技

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号: 2013A0103003)和科技部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: jminhong@126.com

术则刚好相反, 通过激光加速粒子与已知元素成分的材料发生特定核反应产生放射性核素, 测量放射性核素活度, 然后反向求解得到激光加速粒子的参数. 目前, 激光加速粒子常用诊断仪器及方法主要有汤姆孙离子谱仪^[14,15]、辐射变色膜片 (radiochromic dosimetry film, RCF) 组成的滤片堆栈两种. 汤姆孙离子谱仪通过外加电磁场对加速离子种类和能量加以区分、测量, 该方法容易受到实验产生的高频强电磁场的干扰, 并且只能测量很小立体角范围内的离子能谱, 无法给出离子的角分布及总产额等重要参数; RCF 堆栈测谱法通过离子在 RCF 灵敏层产生辐射损伤引起的光学透过率变化, 对离子的辐射剂量 (数量) 进行测量^[16], 可以给出离子的角分布、空间积分能谱. 缺点是不能重复使用, 当离子数量过高时, RCF 会出现饱和. 带电粒子活化测谱技术可以很好地解决上述问题, 不仅可以给出离子的角分布、空间积分能谱等关键参数, 而且不受电磁场干扰、不易饱和, 用作活化材料的铜材料很容易获得, 可以重复使用. 作为传统核诊断技术的新应用, 该研究方法具有十分重要的意义.

活化法在激光粒子加速方面的应用最早由 Clark^[17] 提出, 作者在滤片法测量 X 射线解谱程序

YOGI 的基础上编了解谱程序, 得到一定范围的应用^[18,19]. 本文发展了一种通过求解质子在诊断用铜薄膜组成的堆栈中产生放射性核素的响应矩阵, 利用测量得到的每片铜的放射性活度经过该矩阵直接反推得到离子能谱的方法, 并且对该方法的可靠性进行了自洽检验. 利用该活化方法, 结合成像板 (imaging plate, IP) 对活化铜片进行的辐射成像测量, 还可得到质子的角分布信息. 建立了一套专门用于带电粒子活化测谱的放射性符合测量仪器, 在 XG-III 皮秒激光装置上开展了激光质子加速实验, 利用带电粒子活化测谱方法测量了加速质子的空间积分能谱、角分布等参数.

2 测量仪器及原理

带电粒子活化测谱方法用到的测量仪器是我们专门发展的一套放射性活度符合测量装置, 主要用于激光加速质子能谱诊断. 仪器主要包括两个规格为 $\Phi 75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 的 NaI 核辐射探测器、高压电源、放大器、脉冲幅度甄别器、符合电路、定标器等构件, 仪器还集成了智能通讯及软件控制系统, 可以方便地进行条件设置和获取测量数据, 其工作原理框图如图 1 所示.

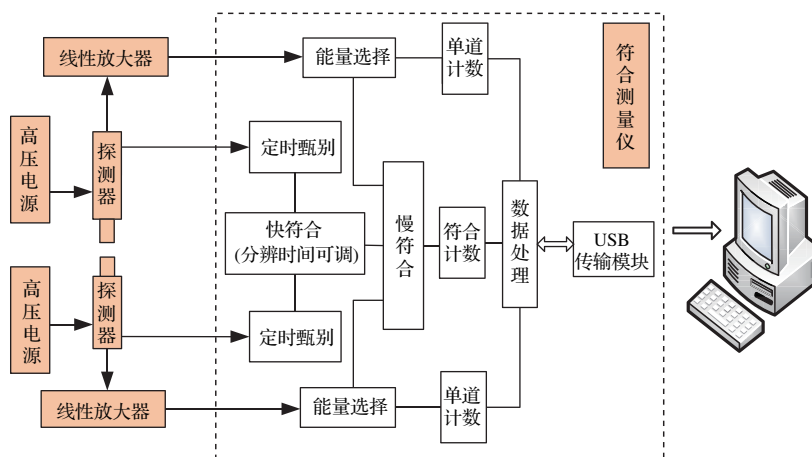


图1 放射性活度符合测量仪工作原理图

Fig. 1. Schematics of radioactivity coincidence measuring instrument.

质子和原子核发生核反应, 一般会产生丰质子的剩余核, 由于打破了质子中子数目的平衡, 通常产生的剩余核都具有 β^+ 衰变特性, 衰变产生的 β^+ 在材料中发生湮灭后产生两个反向、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, 一路进入符合测量仪中得到时间信号, 一路进入线性放大器得到能量信号, 得到的时间信号进行时间符合 (快符合), 得到的能量信号通过能量选择后进行幅度符合, 只有满足快符合时间分辨条件并且

能量为0.511 MeV的光子才能引起慢符合电路的计数. 同时系统对单道选择的光子进行计数, 然后将两个单道计数和符合计数一起发送到计算机终端. 本系统在计算机终端上配备了功能齐全的软件, 可以对放射性核素的能谱、活度、半衰期等进行测量. 使用活度1 μCi ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$) 的 ^{22}Na 正电子源对整个系统的 β^+ 探测效率 η 进行了标定, ^{22}Na 正电子标定源为活度均匀分布的圆形面源, 活性区直径为30 mm, ^{22}Na 元素被两片500 μm 厚的铜密封在中间, 保证衰变产生的 β^+ 完全湮灭在铜片内, 标定源的设计参数尽可能接近活化铜片的参数.

3 方法建立

带电粒子活化材料选择铜, 自然界中铜有两种同位素 ^{63}Cu 和 ^{65}Cu , 丰度分别为69.15%和30.85%. 质子和 ^{63}Cu 可以发生(p, n)反应, 反应的阈值为4 MeV, 最高核反应截面约为500 mb ($1 \text{ mb} = 10^{-27} \text{ cm}^2$). 图2给出了反应截面随能量的变化曲线^[20], 反应生成的剩余核是 ^{63}Zn , 其 β^+ 衰变分支比为93%, 半衰期为38.47 min. 阈值以及半衰期都适合活化测谱, 低阈值可以拓宽测谱下限, 合适的半衰期允许一定的离线测量准备时间, 亦可有足够的放射性计数, 降低统计误差. 质子和 ^{65}Cu 通过(p, 3n)反应也可以产生 ^{63}Zn , 但是该反应通道的阈值很高, 而高能质子数目很少, 通过该反应产生的 ^{63}Zn 可以忽略不计. 因此可以利用 $^{63}\text{Cu}(\text{p}, \text{n})^{63}\text{Zn}$ 这一特定核反应, 通过测量质子活化产生 ^{63}Zn 的活度, 来反推质子能谱, 这就是活化法测谱的基本原理. 需要注意的是, 通过其他核反应通道产生的具有 β^+ 放射性的元素也会被计入符合测量的总活度, 这种情况下, 可以通过多次测量, 根据各放射性核素的半衰期适当选择各次测量的时间间隔, 然后通过计算得到 ^{63}Zn 所占的比例. 根据在XG-III激光装置上的实验结果(质子能量小于20 MeV), 连续测量活化后的铜片10 h, 得到放射性核素衰变曲线, 拟合得到的半衰期为 $(38.39 \pm 0.04) \text{ min}$, 和 ^{63}Zn 的半衰期符合, 如图3所示. 可见质子活化铜的主要产物为 ^{63}Zn , 其他核反应道产生的放射性核素的贡献可以忽略不计. 因此活化测谱技术只需要考虑 $^{63}\text{Cu}(\text{p}, \text{n})^{63}\text{Zn}$ 这一特定核反应即可, 这也为解谱工作带来了方便.

活化测谱的诊断布局如图4所示, 由不同厚度的铜薄膜和RCF组成滤片测谱堆栈. RCF主要是将待测质子能谱尽可能等能量间隔开, 也可以用其他滤片代替; 其次, RCF可以作为辅助测量, 与活化测量结果相互印证. 滤片大小为5 cm $\times$ 5 cm, 一般激光质子源的发散角约为30°—40°. 为得到质子的空间积分能谱, 适当选择堆栈到质子源的距离, 使其覆盖整个质子束斑, 以接收到全部质子. 图4给出了前10层的滤片堆栈组成, 后面的未给出. 根据测谱范围可适当选择滤片层数及滤片厚度. 连续谱的激光质子束入射到滤片堆栈, 由于材料的阻止本领, 不同能量的质子在材料中的射程不同, 位置靠后的铜薄膜产生的放射性主要来自高能质子的贡献, 位置靠前的铜薄膜的放射性则是高能质子和低能质子共同作用产生的. 前后依次排列的铜片将待测能谱分成了若干区间, 如果有 j 片铜, 就将待测能谱分成了 j 个区间, 如果知道每个能量区间在各层铜薄膜中产生 ^{63}Zn 的平均效率, 通过测量 j 片铜的活度, 就可以求得质子能谱.

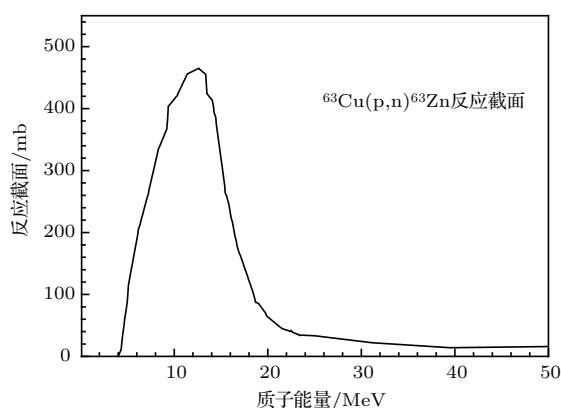


图2 $^{63}\text{Cu}(\text{p}, \text{n})^{63}\text{Zn}$ 反应截面曲线

Fig. 2. Cross section of $^{63}\text{Cu}(\text{p}, \text{n})^{63}\text{Zn}$ reaction.

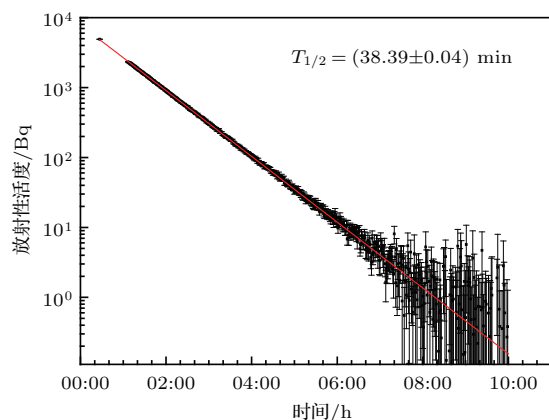


图3 (网刊彩色) 质子铜活化产物半衰期测量曲线

Fig. 3. (color online) Decay curve of radionuclide produced by proton activated copper.

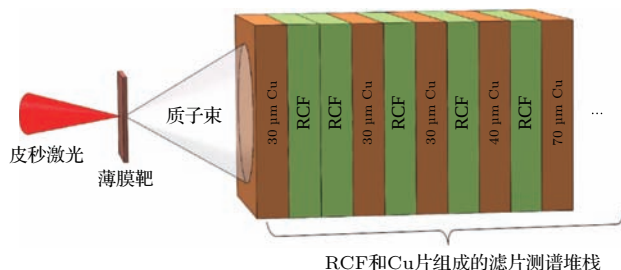


图4 带电粒子活化测谱诊断布局

Fig. 4. The sketch of charged particle activation diagnostics.

计算质子在铜片中产生 ^{63}Zn 的效率, 必须考虑材料对质子的阻止作用, 质子在滤片穿行过程中, 能量不断衰减, 对应的核反应截面也会发生变化. 一定能谱的质子在铜片中产生的 ^{63}Zn 的积分表达式为

$$N = \int_{E_{p1}}^{E_{p2}} \int_0^x n \varepsilon \sigma(E) I(E_p) dE_p dx, \quad (1)$$

$$E = E_p - \int_0^x \left(\frac{dE}{dx} \right) dx, \quad (2)$$

其中 N 代表 ^{63}Zn 产额, n 为铜的粒子数密度, ε 为 ^{63}Cu 的自然丰度, $\sigma(E)$ 代表反应截面, $I(E_p)dE_p$ 代表能量为 E_p 的质子数量, E_{p1} 和 E_{p2} 代表质子能谱的上下限; dE/dx 代表材料对质子的阻止本领, 与质子能量以及材料种类有关. 可以利用蒙特卡罗程序SRIM计算不同材料对质子的阻止本领, 然后利用Matlab编程计算得到不同能量的单个质子在每层铜薄膜中产生 ^{63}Zn 的效率. 针对图4的滤片堆栈布局, 计算结果如图5所示.

从图5可以得到每层铜薄膜产生核反应的最低质子能量, 记为 E_i , 各铜片对应的 E_i 将质子能谱分成了不同的区间, 第 i 个能量区间大小为 $\Delta E_i = E_{i+1} - E_i$, 能量中心值为 $(E_i + E_{i+1})/2$, 由于各层铜片的厚度不大, 能量区间的跨度很小, 各能量区间在不同铜薄膜中产生 ^{63}Zn 的平均效率可以用几何平均值代替. 用 $\delta_{i,j}$ 表示第 i 个能量区间在 j 片铜中产生的 ^{63}Zn 平均效率, 则第 j 片铜产生的放射核素数目 N_j :

$$N_j = \sum_{i=1}^n \delta_{i,j} I_i \Delta E_i$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

式中 I_i 为 ΔE_i 能量区间每能量的质子数目, 也是待求解的量. 将(3)式写成矩阵形式如下:

$$\mathbf{I} \times \boldsymbol{\delta} = \mathbf{N}, \quad (4)$$

$\mathbf{I}$ 是 $I_i \Delta E_i$ 组成的维数 $1 \times n$ 的能谱矩阵, $\mathbf{N}$ 是 N_j 组成的维数 $1 \times n$ 的活度矩阵, $\boldsymbol{\delta}$ 是 $\delta_{i,j}$ 组成的维数 $n \times n$ 的效率矩阵, 或者叫响应矩阵. $\boldsymbol{\delta}$ 通过图5得到, 组成矩阵 $\mathbf{N}$ 的各个分量可以表示为

$$N_j = \frac{A_j}{\eta \omega \lambda e^{-\lambda t}}, \quad (5)$$

其中 A_j 为放射性核素的活度值, 可通过实验测量得到; η 为探测器的探测效率, ω 为 ^{63}Zn 发生 β^+ 衰变的分支比, λ 为 ^{63}Zn 的衰变常数, 均为已知量. 将(4)式两边乘以 $\boldsymbol{\delta}$ 的逆矩阵, 就可以得到质子能谱 $\mathbf{I}$.

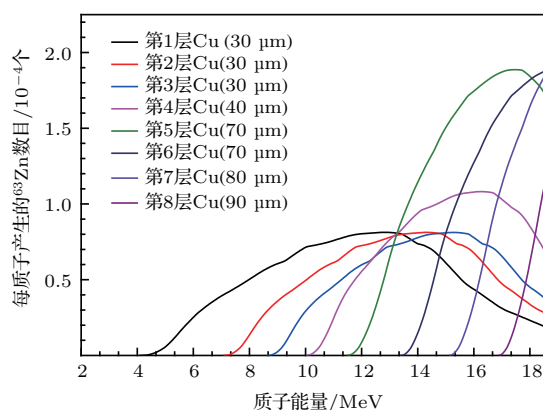

 图5 (网刊彩色) 单个质子在每层铜里面产生的 ^{63}Zn 效率曲线

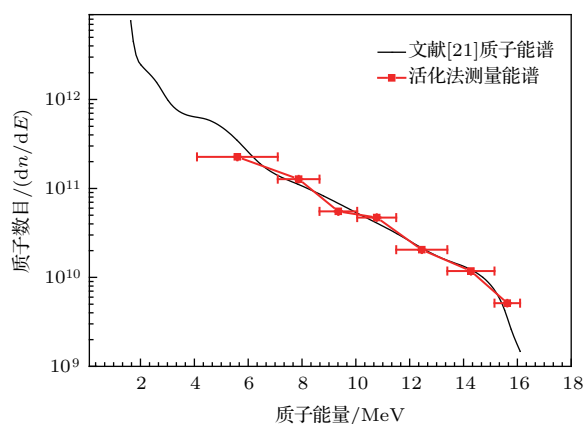
 Fig. 5. (color online) Number of ^{63}Zn atoms produced per proton as a function of proton energy for each layer of copper.


图6 带电粒子活化测谱自洽性检验测谱结果

Fig. 6. Self consistency test result of the method.

为了检验上述带电粒子活化测谱方法的准确性和可靠性, 对该方法进行了自洽性验证. 采用文献[21]中测量的真实激光加速质子能谱作为被诊断能谱, 使该质子束入射到活化测谱堆栈上, 每片铜产生的放射性活度可以通过包含核反应过程的

蒙特卡罗程序计算得到, 将计算得到的放射性活度输入我们的解谱程序, 得到质子能谱, 如图6所示, 两者能很好地符合, 证明了该方法的正确性.

4 实 验

为进一步检验带电粒子活化测谱仪器及方法, 在XG-III皮秒激光装置上开展了激光质子加速实验. 激光能量为116 J, 脉宽约为1 ps, 固体靶材料为铜, 厚度为20 μm , 带电粒子活化测谱的诊断布局如图2所示, 距离质子源5 cm. 激光加速机制为典型的靶背鞘场加速机制. 打靶结束后, 利用放射性活度符合测量仪测量各铜片的活度, 本底测量时间为2 h, 得到本底计数水平. 每片铜的测量时间为180 s. 符合测量完成后, 将铜片放置在IP上, 湮灭产生的 γ 光会使IP感光, 从而得到活化铜片的活性区, 活性区的大小对应质子的角分布. 图7为IP的测量结果, 可以看到清晰的质子束斑大小, 第7, 8片铜由于放射性活度较低, 未记录到明显的感光图像. 从束斑大小可以看出, 质子能量越高, 发散角越小, 以第2, 5片铜为例, 质子在两个铜片产生核反应的能量阈值分别为7.1和11.5 MeV, 通过质子束斑尺寸及距离质子源的距离得到其发散角分

别为 41° 和 20° , 结果与RCF测量结果一致; 图7还给出了质子在铜片中产生的放射性活度, 已根据衰变时间修正到打靶时刻. 活度测量及IP成像测量结束后, 利用第1片铜测量了放射性核素的半衰期, 每60 s测量一次, 连续测量约10 h, 图3给出了放射性核素的衰变曲线, 0时刻为打靶时刻, 图中第1个数据点和后面连续测量之间没有数据, 是因为该时间段内铜片被取出做IP成像测量. 经衰变曲线拟合得到的放射性核素半衰期为38.37 min, 与 ^{63}Zn 的半衰期只有极小的差别, 这个差别来自少量短寿命的 ^{62}Cu .

利用带电粒子活化测谱方法得到的质子能谱如图8所示, 最高质子能量18 MeV, 由于该方法得到的能谱为空间积分能谱, 从能谱数据可以得到大于4 MeV的质子总产额为 1.22×10^{12} 个, 激光能量到质子的转化效率约为1.07%. 质子能谱能量误差主要取决于铜片的厚度, 理论上铜片越薄, 能量分辨越高, 得到的能谱越精细, 但是铜片越薄, 其产生的放射性活度也越低, 会增加活度测量的统计误差; 质子数目的误差主要来自放射性活度测量引入的统计误差, 解谱过程考虑了对该统计误差的传递.

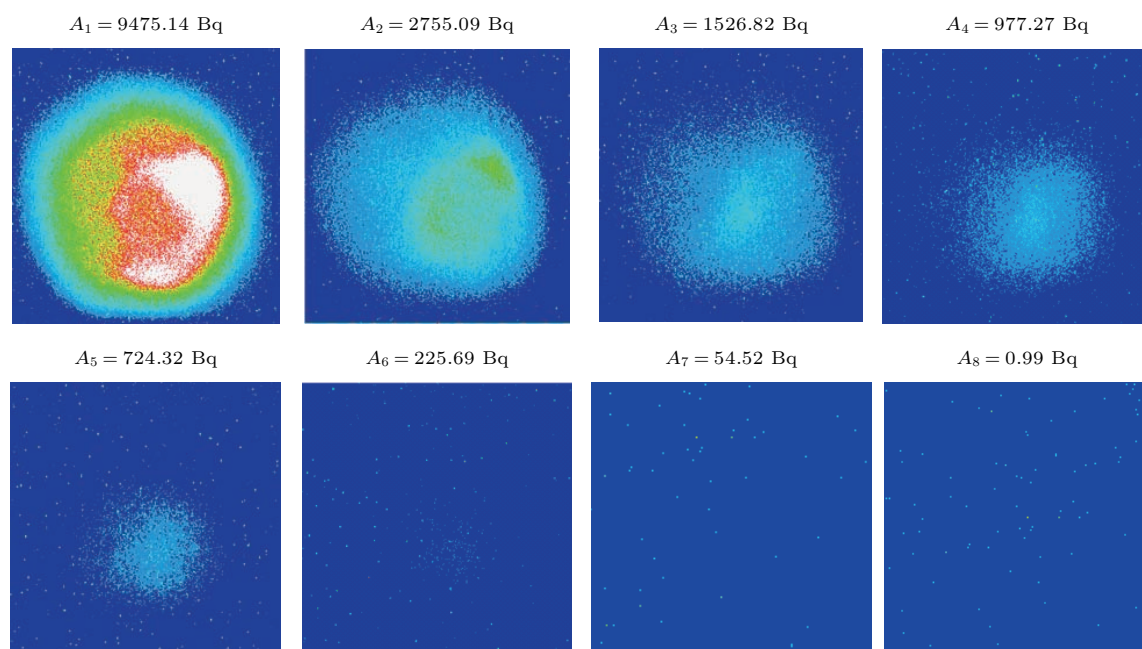


图7 (网刊彩色) 各个铜片的活度及IP板测量的自辐射图像

Fig. 7. (color online) Activity and radiograph of the copper plates.

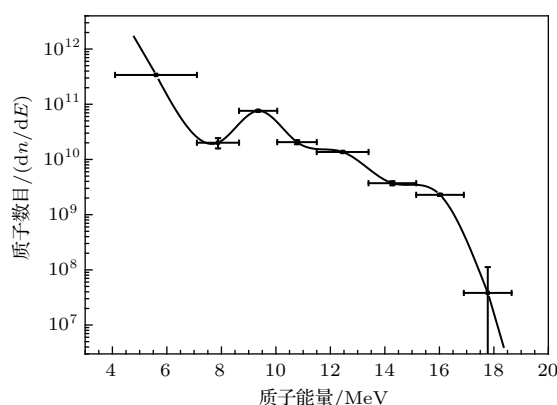


图8 带电粒子活化测谱方法得到的激光加速质子能谱

Fig. 8. Spectrum of laser-driven proton unfolded with our method.

5 结 论

基于带电粒子活化和放射性符合测量技术, 发展了一种诊断激光加速质子参数的方法. 在激光加速质子发射路径上放置不同厚度的铜薄膜组成的滤片堆栈, 质子和 ^{63}Cu 原子核发生(p, n)核反应, 产生放射性核素 ^{63}Zn , 利用符合测量方法测量其放射性活度, 分析求解了质子入射到特定结构滤片堆栈产生 ^{63}Zn 的效率矩阵, 基于活度测量和效率矩阵建立了活化解谱方法, 并对该方法进行了自洽检验, 发展了一套放射性活度符合测量装置, 系统构建了用于激光加速质子参数表征的带电粒子活化测谱技术. 最后在XG-III装置上开展了激光质子加速实验研究, 得到了激光加速质子能谱、激光能量到质子的转化效率等参数, 使带电粒子活化测谱方法得到了具体应用.

带电粒子活化测谱方法的基本原理是核反应, 通过选取适当的活化材料, 利用已知反应截面的特定核反应, 也可以使用该方法对激光加速产生的氦离子、氮离子等带电粒子进行测量, 从而大大拓展该方法的应用范围.

感谢中物院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室周凯南、谢娜、黄征等XG-III激光运行人员在实验上给予的大力支持, 感谢四川大学王忠海博士在符合测量方面给予的有益讨论.

参考文献

- [1] Tajima T, Dawson J M 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 267
- [2] Wagner F, Deppert O, Brabetz C, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 205002

- [3] Dong K G, Gu Y Q, Zhu B, Wu Y C, Cao L F, He Y L, Liu H J, Hong W, Zhou W M, Zhao Z Q, Jiao C Y, Wen X L, Zhang B H, Wang X F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8733 (in Chinese) [董克攻, 谷渝秋, 朱斌, 吴玉迟, 曹磊峰, 何颖玲, 刘红杰, 洪伟, 周维民, 赵宗清, 焦春晖, 温贤伦, 张保汉, 王晓方 2010 物理学报 **59** 8733]
- [4] Ledingham K W D, Spencer I, McCanny T, Singhal R P, Santala M I K, Clark E, Watts I, Beg F N, Zepf M, Krushelnick K, Tatarakis M, Dangor A E, Norreys P A, Allott R, Neely D, Clark R J, Machacek A C, Wark J S, Cresswell A J, Sanderson D C W, Magill J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 899
- [5] Cowan T E, Hunt A W, Phillips T W, Wilks S C, Perry M D, Brown C, Fountain W, Hatchett S, Johnson J, Key M H, Parnell T, Pennington D M, Snavely R A, Takahashi Y, Photonuclear 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 903
- [6] Boyer K, Luk T S, Rhodes C K 1988 *Phys. Rev. Lett.* **60** 557
- [7] Schwoerer H, Ewald F, Sauerbrey R, Galy J, Magill J, Rondinella V, Schenkel R, Butz T 2003 *Europhys. Lett.* **61** 47
- [8] Heinrich S, Joseph M, Burgard B 2006 *Laser and Nuclear: Application of Ultrahigh Intensity Lasers in Nuclear Science* (Lecture Notes in Physics 694) (Berlin: Springer Press) pp25–45
- [9] Wang N Y 2008 *Physics* **37** 9 (in Chinese) [王乃彦 2008 物理 **37** 9]
- [10] Sadighi-Bonabi R, Irani E, Safaie B, Imani Kh, Silatani M, Zare S 2010 *Energy Convers. Manag.* **51** 636
- [11] Petrov G M, Higginson D P, Davis J, Petrova T B, McNaney J M, McGuffey C, Qiao B, Beg F N 2012 *Phys. Plasmas* **19** 093106
- [12] Lefebvre E, Humieres E, Fritzler S, Malka V 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 113308
- [13] Zhao G Q, Ren C G 1989 *Nuclear Analytical Techniques* (Beijing: Atomic Energy Press) p40 (in Chinese) [赵国庆, 任焯刚 1989 核分析技术 (北京: 原子能出版社) 第40页]
- [14] Cobble J A, Flippo K A, Offermann D T, Lopez F E, Oertel J A, Mastrosimone D, Letzring S A, Sinenian N 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 113504
- [15] Morrison J T, Willis C, Freeman R R, van Woerkom L 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 033506
- [16] Nurnberg F, Schollmeier M, Brambrink E, Blazevic A, Carroll D C, Flippo K, Gautier D C, Geissel M, Harres K, Hegelich B M, Lundh O, Markey K, McKenna P, Neely D, Schreiber J, Roth M 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 033301
- [17] Clark E 2001 *Ph. D. Dissertation* (London: University of London)
- [18] Santala M I K, Zepf M, Beg F N, Clark E L, Dangor A E, Krushelnick K, Tatarakis M, Watts I, Ledingham K W D, McCanny T, Spencer I, Machacek A C, Allott R, Clarke R J, Norreys P A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 19
- [19] Yang J M, McKenna P, Ledingham K W D, McCanny T, Shimizu S, Robson L, Clarke R J, Neely D, Norreys

P A, Wei M S, Krushelnick K, Nilson P, Mangles S P
 D, Singhal R P 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 675
 [20] Meadows J W 1953 *Phys. Rev.* **91** 885
 [21] Higginson D P, McNaney J M, Swift D C, Petrov G M,

Davis J, Frenje J A, Jarrott L C, Kodama R, Lancaster
 K L, Mackinnon A J, Nakamura H, Patel P K, Tynan
 G, Beg F N 2011 *Phys. Plasmas* **18** 100703

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

He Shu-Kai¹⁾ Liu Dong-Xiao¹⁾ Jiao Jin-Long¹⁾ Deng Zhi-Gang¹⁾ Teng Jian¹⁾
 Zhang Bo¹⁾ Zhang Zhi-Meng¹⁾ Hong Wei^{1)†} Gu Yu-Qiu¹⁾²⁾³⁾

¹⁾ (Key Laboratory of Plasma Physics, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics,
 Mianyang 621900, China)

²⁾ (International Fusion Sciences and Applications (IFSA) Collaborative Innovation Center, Shanghai Jiao Tong University,
 Shanghai 200240, China)

³⁾ (Center for Applied Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 8 May 2017; revised manuscript received 18 July 2017)

Abstract

The protons accelerated by ultra-high intensity laser have been extensively studied. The most commonly used detectors for measuring laser-driven proton are Tomson parabola ion energy analyser (TP) and filtered nuclear track detectors, such as radiochromic films (RCF). The TP uses a parallel magneto-electric field to distinguish ions. This conventional technique can precisely identify the species and energy spectra of ions. However, the strong electromagnetic field produced by the laser-plasma interaction has an effect on TP, which results in no spatial resolution of TP. The RCF can give the spatial integration spectrum of proton, but it is easy to be saturated and cannot be reused anymore. In this paper, we present a method based on the traditional charged particle activation analysis and the gamma-gamma coincidence measurement to measure the spectrum of protons accelerated by ultra intense lasers. In this method, a copper plate stack is placed in the proton emission direction. Colliding with MeV proton converts ⁶³Cu in the copper plates into radionuclide ⁶³Zn whose decay can be easily observed and measured. Proton spectrum is then recovered from ⁶³Zn decay counts from layers in the copper stack. The layout of diagnostics and the method to solve proton spectrum are discussed in detail and a self-consistent test is given. This spectrum analysis method is used in a laser-driven proton acceleration experiment carried out on XG-III laser facility. The results show that protons up to 18 MeV are obtained, and the spatial integrated spectrum and a laser-proton conversion efficiency of 1.07% are achieved. In conclusion, our method has some advantages as a laser-driven ion diagnostic tool. It has no saturation problem and is not affected by strong electromagnetic fields. The basic principle of charged particle activation analysis is based on nuclear reaction, and can be extended to the measuring of other charged particle beams besides protons, such as deuterons, helium ions produced by ultra-high intensity laser.

Keywords: charged particle activation analysis, laser-driven proton acceleration, coincidence measurement, unfold spectrum

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

DOI: 10.7498/aps.66.205201

* Project supported by the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2013A0103003) and the Major Special Scientific Instruments and Equipment Development of Ministry of Science and Technology, China (Grant No. 2012YQ03014206).

† Corresponding author. E-mail: jminhong@126.com