

0.70~2.48 MeV 质子在 F 和 Mg 上 160° 背散射截面测量

孙旭芳¹, 王 荣^{1,2,*}, 刘运宏¹, 王广甫^{1,2}

(1. 北京师范大学 低能核物理研究所 射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 100875 北京;
2. 北京市辐射中心, 100875 北京)

摘要:应用北京师范大学 2×1.7 MV 串列静电加速器提供的质子束, 采用相对测量方法测量了 0.70~2.48 MeV 宽能区质子在轻核 F 和 Mg 上 160° (实验室坐标系) 背散射截面。测量得到 F、Mg 各自对应能区的质子共振背散射截面数据, 为含 F、Mg 轻元素的新型薄膜材料的高灵敏分析提供了实验数据。

关键词: 质子; F; Mg; 背散射截面

中图分类号: O571

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)10-0875-04

Non-Rutherford 160° Backscattering Cross Sections of 0.70-2.48 MeV Protons on Fluorine and Magnesium

SUN Xu-fang¹, WANG Rong^{1,2,*}, LIU Yun-hong¹, WANG Guang-fu^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of Ministry of Education, Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

2. *Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China*)

Abstract: Differential elastic 160° backscattering cross sections of 0.70-2.48 MeV protons on fluorine and magnesium were measured by relative measuring method. The analysis proton beams were provided by 2×1.7 MV accelerator at Beijing Normal University. The resonance backscattering cross sections of F and Mg were presented in graphical forms, which should be useful for the sensitive analysis of new thin-film materials with F and Mg.

Key words: proton; F; Mg; backscattering cross section

作为常用的微观分析手段, 背散射分析方法可对材料的表层成分或薄膜的纵向成分进行分析, 且无需薄膜或材料的标准样品即能对其

组成成分进行定量分析^[1]。在背散射分析测量中, 一般选用质子或 α 粒子作为入射粒子。质子在材料中的穿透能力强, 能量歧离小, 对轻核

收稿日期: 2007-05-25; 修回日期: 2007-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10675023); 北京市自然科学基金资助项目(1052009); 北京市优秀人才基金资助项目

作者简介: 孙旭芳(1982—), 女, 黑龙江密山人, 硕士研究生, 凝聚态物理专业

* 通信作者: 王 荣, 甘肃陇西人, 实验核物理专业, 电话: 010-62208246

存在共振背散射, 散射截面大, 灵敏度高, 因此, 更适合用来对含轻元素的新型薄膜材料进行分析。但应用此技术对轻元素做定量分析, 尤其是进行深度剖面分析时, 必须知道质子在轻核上的宽能区散射截面数据。目前, 由于核散射理论的不完善性, 这类共振背散射截面尚不能准确计算, 只能借助实验进行测量^[2]。

20 世纪八、九十年代, Rauhala 等^[3] 和 Knox 等^[4] 分别对 0.80~2.70 MeV 质子在 Mg 元素上 170° 背散射截面和 1.00~1.875 MeV 质子在 F 元素上 153° 背散射截面进行了直接实验测量。但实验中采用绝对测量方法, 因而不可避免地涉及到靶厚、立体角、质子束流积分等量的绝对测量。这些量均是难以准确测量的, 致使测量的截面结果质量不高, 主要缺点是能区不宽, 测量结果的误差大, 且误差估计困难。针对这种情况, 我们应用相对测量方法, 通过特制实验靶, 实现对质子在轻元素上背散射截面的相对测量, 克服绝对测量的上述缺点。本工作应用相对测量方法, 分别对轻核 F 和 Mg, 质子能量在 0.70~2.48 MeV 宽能区 160° 背散射截面进行测量。

1 实验方法

靶样品以石墨作衬底, 采用 UTT-400 型超高真空镀膜机, 在真空度为 2.7×10^{-5} Pa 的环境下, 以 10 nm/s 的速率热蒸镀厚约 155 nm 的 MgF₂ 薄膜。在同样真空环境下, 在 MgF₂ 膜上再热蒸发 1 层约 55 nm 的 Ag 膜。

背散射截面测量实验在北京师范大学 2×1.7 MV 串列加速器上进行, 加速器高压用 $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ 在 991.1 和 1799.8 keV 的核反应进行刻度。离子束能量为 1.0 MeV 时, 能量离散小于 2 keV。能谱仪采用分辨率为 13 keV 的金硅面垒探测器。探测散射粒子的散射角是 160°。用一孔径 $\phi 2$ mm 的 Ta 片贴在金硅面垒探测器的前面, 限制探测器立体角为 0.70 msr。质子束经准直后入射到靶上, 靶点直径为 1 mm, 靶室真空度 5.0×10^{-4} Pa。

实验采用相对测量方法^[5], 即用能量处在待测元素卢瑟福散射区的质子轰击薄靶, 以测得的能谱作为标准谱, 将其他能量质子轰击同一靶的能谱与之进行对比。由于卢瑟福散射截

面可以通过理论准确计算, 从而可以得到非卢瑟福能区质子在所测元素上的散射截面数据。这一方法的优点在于, 由于使用同一个薄靶, 与计算相关的靶的厚度、立体角大小、束流积分等量可以相互消除, 从而避免了靶厚、束流积分量及立体角的测量, 实验精确度可以大幅提高。在实验中, 质子能量从 2.48 MeV 渐降至待测 F 与 Mg 核的卢瑟福区, 能量变化步长为 20~30 keV, 在 160° 处用金硅面垒探测器能谱仪测量各能量点的背散射能谱。因 Ag 具有高的原子序数, 故在本实验能区的散射截面可被认为遵从卢瑟福散射公式, 用来作为散射截面的参考。

实验结果可用弹性散射截面测量值 $\sigma(E)$ 和卢瑟福散射截面 $\sigma^R(E)$ 的相对测量比值公式^[6] 计算得到, 有:

$$\frac{\sigma(E)}{\sigma^R(E)} = \frac{A(E)}{A_{\text{Ag}}(E_{\text{Ag}})} \cdot \frac{A_{\text{Ag}}(E_{\text{avg, Ag}})}{A(E_{\text{avg}})} \cdot \left(\frac{E}{E_{\text{Ag}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{E_{\text{avg, Ag}}}{E_{\text{avg}}}\right)^2$$

其中: $\sigma(E)$ 表示实际的弹性散射截面; $\sigma^R(E)$ 表示卢瑟福散射截面(可由理论公式精确计算得到); A, A_{Ag} 分别表示待测元素与参考元素 Ag 在背散射能谱上的峰面积; E, E_{Ag} 分别表示入射粒子穿越待测元素与 Ag 膜时的平均能量(计算时采用直线近似法); $E_{\text{avg}}, E_{\text{avg, Ag}}$ 表示入射粒子能量为待测元素卢瑟福散射区的一个标准谱能量(本实验取 0.77 MeV)时, 入射粒子穿越待测元素与 Ag 膜时的平均能量。

实验中, 散射峰面积积分计数足够高, 以减小统计误差。将 F、Mg 峰下的本底计数进行扣除, 本实验的截面测量误差约为 5%。测量误差主要来自计数的统计涨落和本底计数扣除的误差, 共振区测量误差更小些。在计算卢瑟福散射截面时, F 原子与 Mg 原子核外电子云的屏蔽效应修正未予考虑, 因为实验所采用的是质子能量, 这一修正的计算表明, 屏蔽效应小得完全可以忽略^[7]。入射质子能量较低时, F 峰与 Mg 峰稍有重叠, 用 Origin7.5 软件进行分峰解谱。

2 实验结果

图 1a 和 b 分别示出低能、高能区质子上

述待测元素靶典型的背散射能谱。图 1a 中,入射质子能量为 1.32 MeV,处于卢瑟福背散射能区。最左边为衬底 C 的背散射谱;中间小峰为 F 峰(左)和 Mg 峰(右),最右边高峰为 Ag 峰。在谱图上未观测到其它污染。在图 1b 中,入射质子能量为 1.68 MeV,是典型的核共振区背散射能谱,此时,Mg 的截面出现共振峰。借助运动学及散射截面分析,在实验高能区内,质子不会引起 F 或 Mg 的其他核反应干扰。

图 2a 示出 F 散射截面与入射质子能量的关系。从图 2a 可看出,质子能量为 0.70~1.40 MeV 时,元素 F 的散射截面与卢瑟福散射截面的比值约为 1,即背散射截面在该能量范围内遵从卢瑟福散射截面公式,质子在 F 上的卢瑟福散射截面公式可适用的最大能量为

1.40 MeV;质子能量为 1.40~2.50 MeV 时,元素 F 的散射截面出现连续的共振,且共振随着质子能量的增大而加剧,共振峰处实际散射截面约为卢瑟福散射截面的 2~3 倍。

图 2b 示出 Mg 散射截面与入射质子能量的关系。由图 2b 可看出,质子能量为 0.70~1.50 MeV 时,元素 Mg 的散射截面与卢瑟福散射截面符合得很好,质子在 Mg 上的卢瑟福散射截面公式可适用的最大能量为 1.50 MeV;质子能量大于 1.50 MeV 时,元素 Mg 的散射截面进入共振区。

根据测得的质子能量及其在 F、Mg 上 160°处的相对散射截面具体数值,F 和 Mg 的第 1 个共振峰分别出现在质子能量为 1.46、1.52 MeV 时。第 1 个共振峰处 F 的散射截面

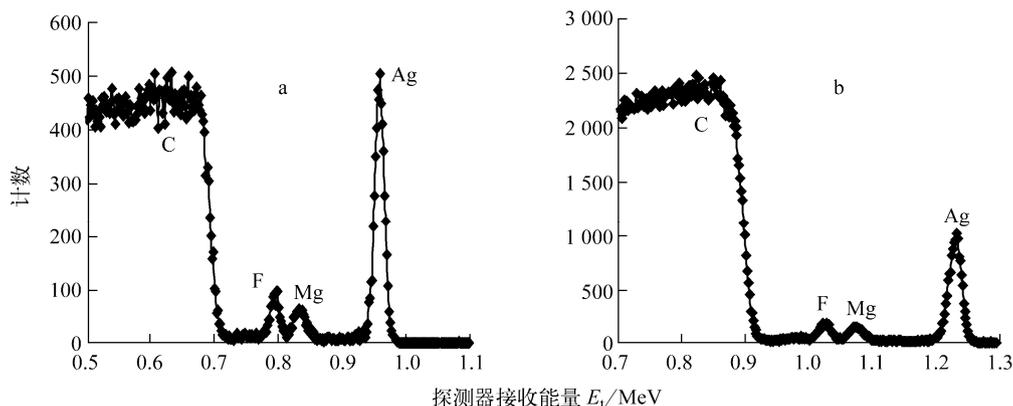


图 1 1.32、1.68 MeV 质子的背散射谱

Fig. 1 Backscattering spectra of 1.32 and 1.68 MeV protons
a—1.32 MeV, $\theta=160^\circ$; b—1.68 MeV, $\theta=160^\circ$

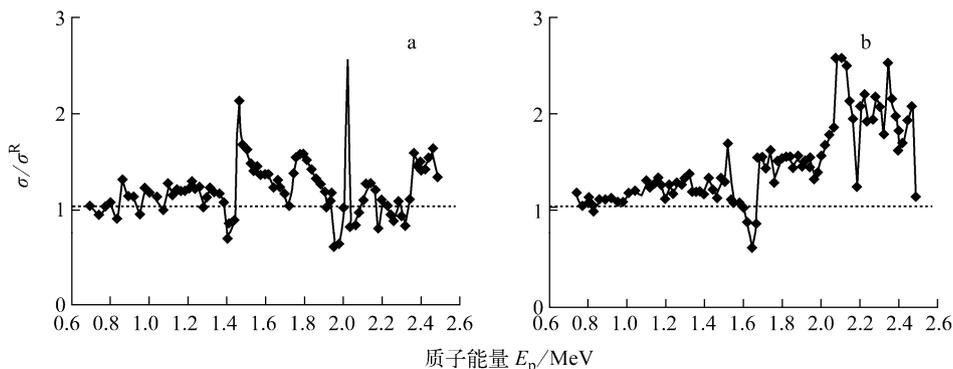


图 2 F(a)、Mg(b) 散射截面与入射质子能量的关系

Fig. 2 Relationship of F (a) and Mg (b) backscattering cross sections and proton energy
 $\theta=160^\circ$

为卢瑟福散射截面的 2.116 倍, Mg 的散射截面为卢瑟福散射截面的 1.616 倍。此后, 背散射进入非卢瑟福区, 散射截面出现连续的共振, F 的散射截面共振峰还出现在质子能量为 1.78、2.02、2.14、2.36、2.46 MeV 时, 共振峰处散射截面与卢瑟福截面的比值分别为 1.560、2.543、1.247、1.575 和 1.613; Mg 的散射截面共振峰还出现在质子能量为 1.70、2.08、2.22、2.34、2.46 MeV 时, 共振峰处散射截面与卢瑟福截面的比值分别为 1.480、2.442、2.089、2.412 和 1.990。与文献[3-4]相比, 采用相对测量方法所测数据精度会更高, 并补充测量了 F 元素更宽能区的背散射截面数据。

3 结论

通过对 0.70~2.48 MeV 宽能区质子在 F 和 Mg 轻核上大角度(160°)背散射截面的相对测量, 分别得出了 F、Mg 各自对应能区的质子共振背散射截面数据。实验结果为含 F 和 Mg 轻元素的新型薄膜材料高灵敏分析提供了实验数据。

参考文献:

- [1] CHU W K. Backscattering spectrometry [M]. New York: Academic Press, 1978: 5-12.
- [2] LUOMAJARVI M. Oxygen detection by non-Rutherford proton backscattering below 2.5 MeV [J]. Nucl Instrum Methods, 1985, B9: 255-258.
- [3] RAUHALA E. Cross sections for 170° backscattering of 0.8-2.7 MeV protons from magnesium and sulfur [J]. Nucl Instrum Methods, 1988, B33: 628-633.
- [4] KNOX J M. Non-Rutherford elastic scattering in fluorine [J]. Nucl Instrum Methods, 1989, B44: 40-42.
- [5] LIU Zhengmin. Non-Rutherford elastic scattering cross sections for 170° backscattering of 0.15-3.00 MeV protons from beryllium [J]. Nucl Instrum Methods, 1994, B93: 404-408.
- [6] LEAVITT J A. Cross sections for 170.5° backscattering of ^4He from carbon for ^4He energies between 1.6 and 5.0 MeV [J]. Nucl Instrum Methods, 1989, B40-41: 776-779.
- [7] ECUYER J L. How accurate are absolute Rutherford backscattering yields [J]. Nucl Instrum Methods, 1979, 160: 337-346.