

文章编号: 1007-1627(2002)01-0039-03

1.30—2.21 MeV 质子在硅上的 160° 散射截面测量*

李公平, 张小东, 刘正民

(兰州大学现代物理系, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 采用厚靶对能量 1.30—2.21 MeV 质子在纯度为 99.99% 硅上的非卢瑟福弹性背散射截面 (160° 背散射角) 进行了测量. 质子束由 2×1.7 MV 卓列加速器提供, 测量仪器采用金硅面垒探测能谱仪. 实验中最低能区进入卢瑟福弹性散射能区, 测量结果与以前发表的结果进行了比较, 所测量数据可供从事背散射分析技术的有关人员参考.

关键词: 质子; 背散射; 截面

中图分类号: O571 **文献标识码:** A

1 引言

作为固体表面微量分析的一种重要手段, 离子背散射技术已得到较广泛的应用. 长期以来, 这方面的工作多用 ^4He 束进行. 这对轻基底中的较重杂质有高的灵敏度, 可给出杂质的原子质量含量和表面层的深度分布. 但利用 ^4He 束对轻杂质的分析却很不灵敏, 从而限制了其应用范围. 这时应用质子进行背散射分析有明显的优越性. 质子在物质中的穿透力强, 能量歧离小, 对轻核存在共振背散射, 散射截面大, 灵敏度高^[1]. 但应用此技术对轻元素定量分析, 尤其对深度剖面分析时, 需用到质子在轻核上的宽能区散射截面数值. 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^[2], 只能借助实验进行测量.

近年来, 由于含硅元素的新型固体材料不断出现, 如硅离子注入表面改性层、SiC 薄膜及表面层等. 在应用质子背散射分析技术对这类材料进行表面定量分析时, 不可避免地需要用到质子在硅上的散射截面数据.

目前, 背散射分析技术常用能区质子在硅上的截面数据很不完备, 仅有 3 组数据. 一组是 1959 年 Vorona 等^[3]测量的 1.10—3.80 MeV 能区 167.2° 角的激发函数曲线; 一组是 1961 年 Belote 等^[4]测量的 2.00—5.00 MeV 能区 164.5° 角的激发函数曲

线; 另一组是 1985 年 Rauhala^[5]测量的 1.47—2.20 MeV 能区 170° 角的激发函数曲线和数据. 前两组用化合物样品, 采用绝对测量法. 由于当时测量仪器手段落后, 采用的是闪烁探测器, 因而数据可靠性差, 只测出了截面随入射质子能量变化的趋势, 没有数据和测量误差, 对背散射分析不能使用. 后一组用化合物样品厚靶, 采用拟合法, 该方法是采用 2.3 MeV 的单能质子轰击由 SiO_2 覆盖的 Si 厚靶得到一个无限厚靶的背散射能谱, 而后用计算机拟合该能谱. 在拟合中, 需算出质子在样品不同深度处的能量数值, 然后用不同能量时的散射截面数据去拟合谱的高度. 当试用的截面数值合适时, 拟合曲线与实验谱完全拟合, 这时采用的截面值即为最终结果. 由于采用这种方法需用到质子在 SiO_2 及 Si 中的能损数值, 而这些数值的理论计算结果与实验值存在一定的偏离, 因而得到的结果无法给出误差, 可靠性有待于直接实验结果的验证. 为此本工作对能量 1.30—2.21 MeV 质子在硅上的 160° 背散射角的截面数值进行了直接实验测量.

2 实验方法

本实验采用相对测量方法: 即应用能量处在硅的卢瑟福散射区的质子轰击硅薄靶, 测得的能谱作为标准谱, 将其它能量质子轰击同一靶的能谱与之比较, 由于质子在硅上的卢瑟福散射截面可以通过

收稿日期: 2001-09-18; 修改日期: 2002-02-08

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19775022)

作者简介: 李公平(1964—), 男(汉族), 河南济源人, 在读博士, 副教授, 从事离子束与物质相互作用及应用研究.

理论准确计算, 从而可以得到非卢瑟福能区质子在硅上的散射截面数据. 这一方法的优点在于, 由于使用同一个薄靶, 因而与计算相关的靶厚度、立体角大小等可以相互消除, 从而避免了靶厚及立体角

的测量; 束流强度用同一硅靶表面蒸金薄膜作为监督, 而质子在金上的背散射在实验能区均为卢瑟福散射, 从而避免了束流的直接测量. 这些措施使得测量精确度可以大大提高.

表 1 质子在硅上的背散射截面 (160° 散射角) *

E_s / keV	σ / (mb · sr ⁻¹)	δ	E_s / keV	σ / (mb · sr ⁻¹)	δ
1.298	169	0.09	1.762	133	0.08
1.329	157	0.09	1.783	127	0.08
1.357	150	0.09	1.803	120	0.08
1.387	147	0.08	1.823	115	0.08
1.409	132	0.08	1.843	113	0.08
1.429	124	0.08	1.863	108	0.08
1.449	118	0.08	1.883	105	0.08
1.469	113	0.08	1.903	103	0.08
1.481	107	0.08	1.923	102	0.08
1.501	101	0.08	1.943	97	0.08
1.521	93	0.08	1.963	92	0.08
1.541	82	0.08	1.983	83	0.08
1.561	68	0.08	2.004	77	0.08
1.581	56	0.08	2.024	64	0.08
1.601	49	0.08	2.044	54	0.08
1.621	105	0.08	2.074	60	0.08
1.641	224	0.08	2.094	83	0.08
1.647	241	0.08	2.081	206	0.08
1.653	249	0.08	2.101	137	0.08
1.661	233	0.08	2.121	121	0.08
1.682	188	0.08	2.144	105	0.08
1.702	168	0.08	2.164	97	0.08
1.722	152	0.08	2.187	89	0.08
1.742	139	0.08	2.207	83	0.08

* E_s 是质子在硅中的平均能量, δ 是实验的标准误差.

实验是在兰州大学 2 × 1.7 MV 串列加速器上进行的, 加速器高压采用 ²⁷Al(p, γ)²⁸Si 在 991.1 和 1799.8 keV 的共振反应刻度. 离子束能量在 1.0 MeV 时, 能量离散小于 2 keV. 探测器能量分辨为 12 keV. 测量角为 160°. 束流通过两个相距 1.5 m 的光阑准直. 靶上束斑面积 0.7 mm · 0.7 mm. 探测立体角为 (0.48 ± 0.01) msr. 实验用靶采用石墨基底, 将纯度 99.99% 的硅蒸在碳基底上, 再将纯度为 99.99% 金蒸在硅膜上. 由 ⁴He 背散射分析得到的硅靶和金膜厚度分别为 4.7 · 10¹⁵ 和 2.4 · 10¹⁷ atoms/cm².

3 实验结果和讨论

实验中质子能量从 2.21 MeV 渐降至待测核的卢瑟福散射能区. 能量变化步长 6—20 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. 以前的实验结果表明, 在 1.36 MeV 能

量以下, 质子在硅上的背散射是卢瑟福散射^[5]. 各点的质子能量修正成质子在靶原子薄层中的平均能量. 具体相对测量公式为^[6]

$$\sigma^s(E_s) = \frac{A_{Si}(E_{Si})/A_{Au}(E_{Au}) \cdot (E_{Au}^0/E_s)}{A_{Si}^0(E_s^0)/A_{Au}^0(E_{Au}^0) \cdot (E_{Au}^0/E_{Au})} \sigma_R^s(E_s^0), \quad (1)$$

式中, $\sigma^s(E_s)$ 为质子能量为 E_s 时的 Si 元素的待测截面, $A_{Si}^0(E_s^0)$ 和 $A_{Au}^0(E_{Au}^0)$ 分别表示待测元素 Si 与参考元素 Au 在质子束能量 E^0 (卢瑟福能区) 时背散射能谱上的峰面积, E_s^0 和 E_{Au}^0 分别表示质子束能量为 E^0 时, 在 Si 和 Au 膜中质子平均能量, $A_{Si}(E_s)$, $A_{Au}(E_{Au})$, E_s 和 E_{Au} 分别表示任一束流能量点所对应 Si 和 Au 的峰面积及质子在 Si 和 Au 膜中平均能量, $\sigma_R^s(E_s^0)$ 是质子能量 E_s^0 时 Si 的卢瑟福截面值. 它可由理论公式精确计算得到. 质子引起硅的其它核反应的干扰在本实验能区内未观测到^[1]. 在计算质子在硅上的卢瑟福散射截面时, 硅原子核外电子

云的屏蔽效应修正没有考虑。因为在本实验的质子能区内, 这一屏蔽效应的影响小得完全可以忽略^[7]。测得的截面值以及按误差传递公式^[8]由公式(1)所得的标准误差均列在表1中。图1中绘出了所测背散射截面与质子能量关系曲线, 以及 Rauhala^[5]在 $\theta=170^\circ$ 对硅的测量结果。由于本实验中标准点即卢瑟福散射能区的截面值由理论算出, 其误差定义为零。大量实验已经证明卢瑟福截面的理论计算值配以电子云屏蔽修正, 其结果与实验值偏离很小^[9]。

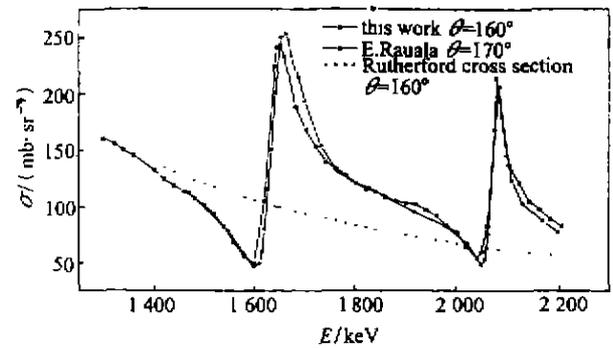


图1 硅的背散射截面与质子能量 1.30—2.21 MeV 的关系

参 考 文 献:

- [1] Chu W K, Mayer J W, Nicolet M. Backscattering Spectrometry[M]. New York: Academic Press, 1978. 21—43.
- [2] Luomajarvi M, Rauhala E, Hautala M. Oxygen Detection by Non-Rutherford Proton Backscattering below 2.5 MeV[J]. Nucl Instr and Meth, 1985, **B9**: 255—258.
- [3] Vorona J, Olness J W, Haerberli W, et al. Levels of ^{28}Si from $^{28}\text{Si}(p, p)^{28}\text{Si}$ and $^{28}\text{Si}(p, p)^{28}\text{Si}$ [J]. Phys Rev, 1939, **116** (6): 1564—1571.
- [4] Belote T A, Kasly E, Risser J R. Excited States in ^{28}P from the Scattering of Protons by ^{28}Si [J]. Phys Rev, 1961, **122**(1): 920—928.
- [5] Rauhala E. Proton Elastic Scattering Cross Sections of Carbon, Nitrogen and Silicon for Backscattering Analysis in the Energy Range 0.7—2.5 MeV[J]. Nucl Instr and Meth, 1985, **B12**: 447—452.
- [6] Liu Zhengmin, Li Beijing, Duan Zhenzhong, et al. Cross Section Measurements for 170° Backscattering of Protons from Carbon in the Energy Range 0.3—3.0 MeV[J]. Nucl Instr and Meth, 1993, **B74**: 439—442.
- [7] Ecuyer J L, Davies J A, Matsunami N. How Accurate Are Absolute Rutherford Backscattering Yields[J]. Nucl Instr and Meth, 1979, **160**: 137—146.
- [8] Parratt L G. Probability and Experimental Errors in Science [M]. New York: Wiley, 1961. 32—41.

Non-Rutherford Elastic Scattering Cross Sections for 160° Backscattering of 1.30—2.21 MeV Protons on Silicon*

LI Gong-ping, ZHANG Xiao-dong, LIU Zheng-min

(Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The elastic backscattering cross sections of H^+ from silicon for a wide energy range are very useful parameters in the proton backscattering analysis for investigating silicon content and distribution profiles in the films. It is necessary to measure the scattering cross sections with good accuracy at a large scattering angle for the applications of proton backscattering analysis. The present paper reports our measured results of differential elastic backscattering cross sections of 1.30—2.21 MeV protons on silicon of 99.99% purity at a laboratory scattering angle of 160° . Analyzed beams of H^+ were provided by a 2×1.7 MV tandem accelerator at Lanzhou University. The lowest proton energy in the experiment is in the Rutherford backscattering energy region. The measured cross sections are presented and compared with previous graphical data. The data have been presented in a form that should be useful for those who wish to use the cross section values of $^{28}\text{Si}(p, p)^{28}\text{Si}$ near 160° in a wider energy region.

Key words: proton; backscattering; cross section

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(19775022)