第 21 卷 第 3 期
2004 年 9 月

原子核物理评论
Nuclear Physics Review

Vol. 21, No. 3
Sep., 2004

文章编号：1007－4627(2004)03－0249－04

α-$Si_{1-x}C_x$：H 薄膜材料的弹性反冲探测分析*

周　平[1,2]，路秀琴[1]，郭继宇[1]，赵　葵[1]，吴伟明[2]，隋　丽[1]，倪嵋楠[1]，
梅俊平[1]，罗红兵[1]，刘建成[1]

(1 中国原子能科学研究院核物理所，北京 102413；
2 广西大学物理科学与工程技术学院，广西 南宁 530004)

摘　要：介绍在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上，对 α-$Si_{1-x}C_x$：H 薄膜样品进行弹性反冲探测分析的方法和结果. 用该加速器提供的高品质^{127}I 束流轰击 α-$Si_{1-x}C_x$：H 薄膜材料样品，用 ΔE(gas)-E(PSD)望远镜探测器，在前角区(30°角)测量从该样品中反冲的各元素的能谱. 然后用离子束分析(IBA)程序 SIMNRA 对能谱进行拟合，得到样品中 H，C 和 Si 的比分及深度分布.

关 键 词：弹性反冲探测分析；非晶氢化硅碳薄膜；ΔE-E 望远镜探测器

中图分类号：O571　　**文献标识码**：A

1　引言

能隙宽度在 1.70—3.30 eV 范围的非晶氢化硅碳薄膜(α-$Si_{1-x}C_x$：H)是一种适用于 α-Si 基太阳能电池的材料. 高质量的本征 α-$Si_{1-x}C_x$：H 薄膜材料的应用范围愈来愈广，如在发光二极管(LED)薄膜探测器、光子接受器等方面的应用. 尤其是用于 LED 的非晶碳化硅薄膜，它具有独特的优越性，如低功率消耗，以及大面积固态大平板多色显示的可能性. 因为这种薄膜材料的能隙范围在 1.70—3.30 eV 之间，而且可以通过简单的调节成分来控制，它在一个较宽的可见光范围内具有电致发光的特性，使其有可能成为一种非常适合于可见光 LED 的材料[1]. 因为材料的成分及其杂质(尤其是 H 元素)的浓度分布直接影响着材料的各种性能，所以对其进行精确的测定是新材料研制中面临的重要问题.

弹性反冲探测分析(ERDA)技术是核分析技术的重要组成部分. 它是 1976 年 L'Ecuyer 等[2]针对重衬底上的轻元素测量问题首次提出的. 对于重衬底中的轻元素的分析，它不仅能够实现同时对多元素的分析，而且大大地减小对材料的辐射损伤. 在核分析技术中，只有 ERDA 技术同时具有这些优点[3]. 本文介绍利用 ΔE-E 望远镜探测器对 α-$Si_{1-x}C_x$：H 薄膜材料进行 ERDA 的方法和结果.

2　实验原理

当质量为 M_1 的离子以 E_1 的能量轰击质量为 M_2 的靶核时，在与入射方向呈 θ 角处靶核的反冲能量 E_2 为

$$E_2 = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2}E_1\cos^2\theta . \tag{1}$$

当入射核能量在～1 MeV/u 能区时，反冲核的截面为卢瑟福散射截面：

$$\sigma_R(E_1,\theta) = \left(\frac{Z_1Z_2e^2}{2E_1}\right)^2\left[\frac{M_1+M_2}{M_2}\right]^2\cos^{-3}\theta , \tag{2}$$

式中 Z_1 和 Z_2 分别为入射核和靶核的核电荷数. 只要测得反冲核的能谱，即可根据入射核和出射核在靶中的能损和反冲截面推算出该元素的成分和深度分布.

为了分辨靶材料中的各元素，得到每种元素的单独能谱，我们采用 ΔE(gas)-E(PSD)望远镜探测器探测反冲离子. 当能量为 E 的带电离子穿过气体电离室探测器时，损失的能量为 ΔE，一维位置灵敏探测器测得的能量为剩余能量 $E_r = E - \Delta E$. 如果 $E_r \gg \Delta E$，由 Bethe-Block 公式可得

$$E_r\Delta E \propto MZ^2 , \tag{3}$$

收稿日期：2003 - 12 - 19；**修改日期**：2004 - 04 - 01

* **基金项目**：国际原子能机构(IAEA)支持的国际合作项目(CPR-11314)

作者简介：周　平（1976 — ），男(汉族)，河南信阳人，在读硕士，从事弹性反冲探测分析研究.

式中 M 为反冲离子的质量数，Z 为反冲离子的核电荷数. 由(3)式可知，具有不同核电荷数的元素在 ΔE 对 E_r 的二维谱上落在不同的带子上，即可实现粒子分辨. 然后对二维谱中的每种元素进行作门并投影得到各元素的能谱.

我们用公式(1)计算了 140 MeV 的 ^{127}I 入射，在 30°处从靶表面出射的 H，C 和 Si 的能量为 E_2，利用 TRIM 程序[4]计算反冲离子在探测器前窗膜和气体电离室中的能损，ΔE_f 和 ΔE，并计算出各离子最后的剩余能量 E_r. 计算结果如表 1 所示.

表 1 在 30°处从薄膜表面反冲的出射核的能量

元素	E_2/MeV	ΔE_f/MeV	ΔE/MeV	E_r/MeV
H	3.256	0.034	0.063	3.159
C	33.129	1.276	2.323	29.553
Si	62.165	5.506	9.900	46.760

由表 1 可见，在此实验条件下 C 和 Si 离子在 ΔE 中损失其能量的一小部分进入 E_r 探测器，而 H 离子在通过电离室时能损很小，其 ΔE 信号与实验中噪声的水平相当而被卡掉，因此不会出现在 ΔE 与 E_r 符合谱中. 因而，我们可以从 ΔE 与 E_r 的符合信号得到 C 和 Si 元素的能谱，由不符合信号得到 H 元素的能谱.

3 实验概况

实验是在中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器上进行的. 图 1 为实验装置示意图，用该加速器提供的高品质的 ^{127}I 束流轰击靶材料. 束流能量为 140 MeV，能量离散度为 10^{-4}. 束流经过由前后相距 128 mm 的两个严格平行和尺寸均为 1.0 mm×4.0 mm 的光栏组成的准直器，以与靶面呈 15°角入射到靶上. α-$Si_{1-x}C_x$: H 薄膜靶材料是由南斯拉夫克罗地亚的实验组制备的. 样品衬底为普通玻璃. 应用 ΔE(gas)-E(PSD)望远镜探测器探测出射粒子. 该探测器与文献[5]的相似，探测器几何中心位于与束流方向呈 30°处，探测立体角为 1.95 msr. 图 2 为该探测器结构示意图. 纵向型双电离室长度为 64 mm. 前窗和半导体表面及电离室中心位于零电压. 两个阳极在本次实验中连接在一起得到 ΔE 信号. 4 个等压环结构保证其电场均匀分布. 电离室前窗膜为双面镀铝(30 μg/cm^2)的 Mylar 膜，Mylar 膜厚度为 2 μm. 实验过程中电离室工作在气压为(80±0.1) mbar 的稳压流气状态，电离室内所充气体为 P10 气体(90%Ar+10%CH_4). 探测器工作电压为：电离室阳极电压 350 V，等压极电压 100 V，位置灵敏半导体偏压为 40 V.

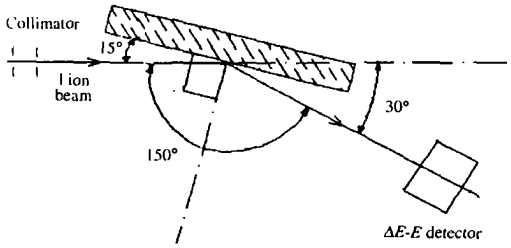

图 1 实验装置示意图

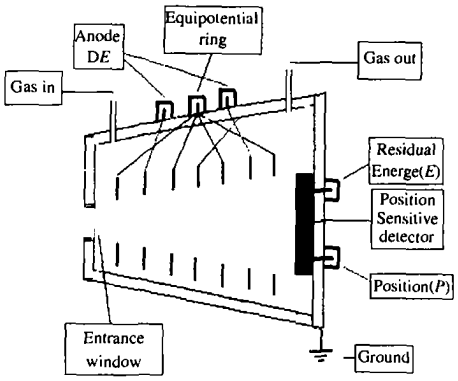

图 2 ΔE-E 望远镜探测器结构示意图

用 MVAXL 计算机在线数据获取系统 XSYS 进行实验在线数据获取，并将数据按事件方式存到磁盘上，以备离线分析时用. 对样品进行辐照后，我们又分别用能量为 140，115，90 和 65 MeV 的 ^{127}I束流轰击 SiO_2，CHN/Si 和 C 3 种靶，在同样的几何条件下进行了能量刻度.

4 数据分析及结果

4.1 数据分析

实验后用 PAW 程序进行离线数据分析，包括：得到如图 3 所示的 ΔE-E 二维谱，在 ΔE-E 二维谱上对 C 和 Si 带作门、投影得到 C 和 Si 的一维能谱，从 E_r 的不符合谱得到 H 的能谱；利用在上述 4 个能量处测得的 H，C，N，O 和 Si 离子的能谱进行能量标度，得出能量-道数线；根据 ΔE 和 E_r 两路能量刻度线推出相加系数，从 ΔE 和 E_r 信号得到总能量的能谱；利用位置灵敏探测器测得的位置

信号对由探测器张角引起的运动学展宽效应进行能量修正；几何位置修正.

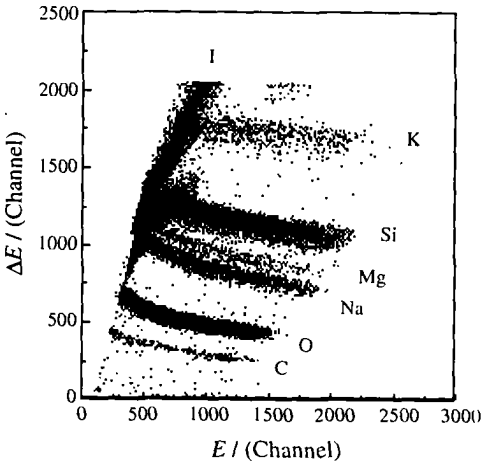

图 3　ΔE-E 望远镜探测器得到的 α-$Si_{1-x}C_x$：H 的二维谱

实验结束时我们发现，样品表面的束斑偏离几何中心约 2.0 mm. 由公式(1)和(2)很容易看出，无论是反冲离子能量，还是反冲离子的卢瑟福散射截面，对探测角度及靶角都非常敏感，出射角度的偏离会引起出射核在靶中路程的偏差，从而导致计算深度的偏离；所引起的计算截面的偏差，带来元素浓度结果的误差. 所以实验处理时对由此偏离引起的几何偏差进行了修正. 修正的几何示意图如图 4 所示. 图 4 中 D 为束斑到探测器前窗的距离，θ_0 为设计的探测器中心线与束流的夹角，$\Delta\theta$ 为因束斑偏离引起的探测角度偏差，θ 为实际的探测中心线与束流的夹角，δ 为靶偏离中心位置的距离.

利用近似计算公式[6]

$$\Delta\theta \approx \frac{2\delta}{D}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{4}$$

进行角度修正，得到修正后的探测器中心角度 $\theta=29.78°$.

用离子束分析程序 SIMNRA[7] 对各元素的能谱进行拟合，得到各元素的成分原子数百分比和深度分布. 在 SIMNRA 计算程序中包括了采用卢瑟福散射截面和 Ziegler-Biersack 公式计算电子的阻止本领，用通用的 ZBL-势(Ziegler Biersack Littmark-potential)来估算核的阻止本领，还考虑了离子在靶样品、前窗膜及气体中的多次散射和能量歧离效应.

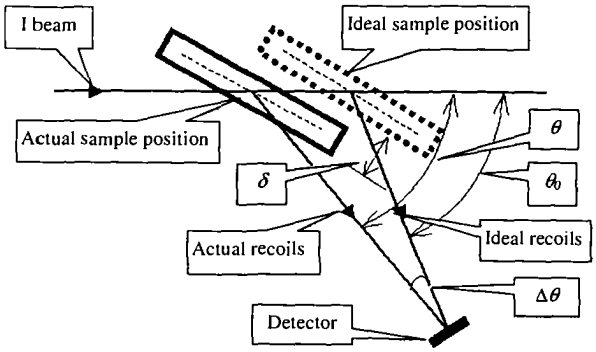

图 4　中心位置几何偏离 δ 示意图

4.2　实验结果

图 3 给出了 α-$Si_{1-x}C_x$：H 薄膜样品 1 的 ΔE-E 二维谱. 该图中 C 和高能部分的 Si 来自薄膜样品，Si 的低能部分和 O，Na，Mg，K 是从玻璃衬底中来的，而 I 则是束流从靶中重核上散射后进入探测系统的.

图 5 给出 α-$Si_{1-x}C_x$：H 样品 1 中 Si，C 和 H 的能谱. 图中圆点表示实验数据点，曲线表示用

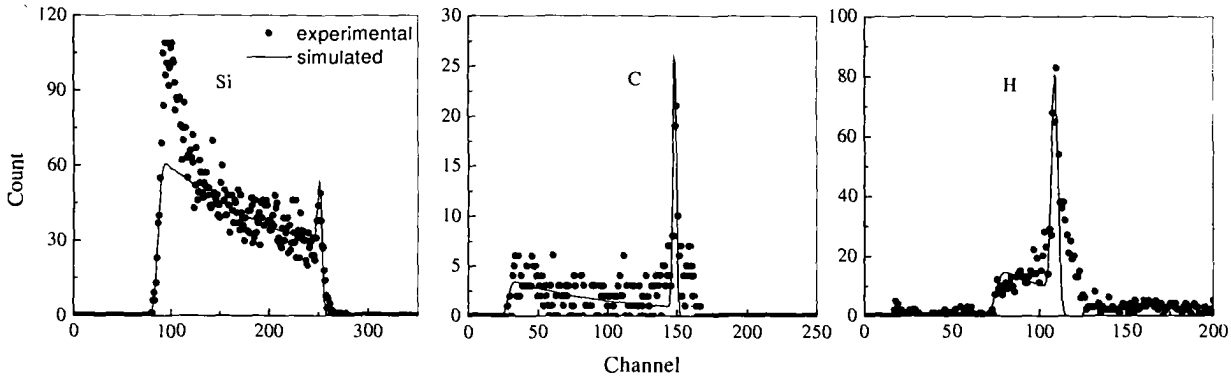

图 5　α-$Si_{1-x}C_x$：H 样品 1 中各成分的能谱和 SIMNRA 拟合

SIMNRA 程序对实验点的拟合结果. 图中右面的尖峰来自 α-$Si_{1-x}C_x$: H 薄膜样品中所含的元素，尖峰左面平台反映衬底中该元素的含量，得到的各元素成分原子数百分比及厚度列于表 2.

表 2 两块 $Si_{1-x}C_x$: H 薄膜样品的厚度及成分比

样品	厚度 (10^{15}ato · cm^{-2})	成分比(%)		
		Si	H	C
1	200	0.55	0.25	0.20
2	200	0.58	0.27	0.15

5 结论

利用中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器提供的高品质 ^{127}I 束流，用弹性反冲探测技术和 ΔE-E 粒子分辨技术进行符合和不符合测量，同时得到 Si，C 和 H 各元素的能谱，再利用离子束分析程序 SIMNRA 进行拟合，得到 α-$Si_{1-x}C_x$: H 薄膜样品中 Si，C 和 H 的比分及深度分布. 此种方法的建立，必将在对含有多种元素成分和杂质的功能材料分析中得到广泛的应用，从而对功能材料的开发研制及机理研究具有很强的指导意义.

参 考 文 献:

[1] 容幸福，秦志钰. 真空，2000，**3**: 10.

[2] L'Ecuyer J, Brassard C, Cardinal C, *et al*. J Appl Phys, 1976, **47**: 381.

[3] 路秀琴，符长波，郭继宇等. 物理，2001，**6**: 368.

[4] Ziegler J F. The Stopping Range of Ions in Matter IBM Research. Trim-96. 01. 28-0 Yorktown Heights, NY 10598, USA: 1996.

[5] 李松林，胡晓庆，诸永泰等. 高能物理与核物理，1988，**12** (4): 529.

[6] Verda R D, Tesmer J R, Maggiore C J, *et al*. Nucl Instr & Meth, 2001, **B183**: 391.

[7] Matej Mayer. SIMNRA User's Guide. Version 4.4. Garching, Germany: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 1997, 1998, 1—84.

Elastic Recoil Detection Analysis of α-$Si_{1-x}C_x$: H Thin Films*

ZHOU Ping [1,2], LU Xiu-qin[1], GUO Ji-yu[1], ZHAO Kui[1], WU Wei-ming[2], SUI Li[1], NI Mei-nan[1], MEI Jun-ping[1], LUO Hong-bing[1], LIU Jian-cheng[1]

(1 *China Institute of Atomic Energy*, *Beijing* 102413, *China*;

2 *Department of Physics*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *Guangxi*, *China*)

Abstract: Elastic recoil detection analysis of α-$Si_{1-x}C_x$: H foils has been performed at the HI-13 tandem accelerator of CIAE. High quality ^{127}I beam bombards the target of α-$Si_{1-x}C_x$: H thin film. A ΔE(gas)-E(PSD) telescope was used to measure the energy spectra of all elements recoiled from the samples at the angle of 30° in laboratory system. Components of H, C and Si and the profiles were obtained by simulation of the energy spectra using the program SIMNRA calculation.

Key words: elastic recoil detection analysis; amorphous silicon carbon film; ΔE-E telescope

* **Foundation item**: International Co-ordinated Project Supported by International Atomic Energy Agency (CPR-11314)