

文章编号: 1007-4627(2004)01-0034-04

## 加速器束流脉冲化及氢二次离子发射研究\*

丁富荣, 史平, 王尧, 聂锐, 沈定予, 马宏骥

(北京大学技术物理系, 北京 100871)

**摘要:** 详细介绍了快速高压晶体管开关在加速器束流脉冲化和用于二次离子测量的加速器飞行时间谱仪上的应用. 利用飞行时间法研究了碳纳米管在不同能量的 Si 和 Si<sub>2</sub> 团簇离子轰击下氢二次离子的发射. 实验结果表明, 在每个原子质量单位的速度为  $2.5 \times 10^8$  cm/s 以上, Si 和 Si<sub>2</sub> 离子引起的氢二次离子的发射主要受电子阻止过程控制; 在每个原子质量单位的速度为  $2.5 \times 10^8$  cm/s 以下和 Si<sub>2</sub> 团簇离子轰击的情况下, 氢二次离子的发射产额明显增加, 团簇离子在靶表面的核能损增强效应起主要作用.

**关键词:** 飞行时间; 团簇离子; 二次离子发射; 阻止本领

**中图分类号:** TL817+.8; O571.33 **文献标识码:** A

### 1 引言

当载能团簇离子进入固体时, 它们的束缚电子被剥离, 由于相互排斥的库仑作用, 运动着的带电团簇成分将逐步散开. 如果团簇成分之间的距离比较小, 团簇成分之间仍保持着一定的空间关联, 则会在入射路径上产生非常高的能量沉积密度, 在固体中造成局部高温高压的环境. 与单个人射离子相比, 载能团簇离子可产生许多非线性效应, 如非线性能损、非线性二次离子发射、高溅射产额以及在辐照物质中产生大的弹坑和径迹. 产生这种非线性效应的原因通常被认为是由于团簇离子的集体作用或近邻效应的结果.

对载能离子(包括团簇离子)诱发二次离子发射的研究有助于理解离子与物质相互作用过程中的能量沉积与释放机制<sup>[1-7]</sup>. 一般讲, 载能离子和团簇离子诱发二次离子发射的产额与它们的能量沉积密度、团簇种类和大小、电荷态以及靶物质的结构有关<sup>[8-10]</sup>. 本文主要介绍利用快速高压晶体管开关(简称 HTS)使加速器束流脉冲化和加速器上飞行时间谱仪的建立, 并利用该飞行时间装置研究碳纳米管材料在 MeV 能量的 Si 离子和 Si<sub>2</sub> 团簇离子轰击下的氢二次离子的发射.

### 2 HTS 工作原理

HTS 是一种体积非常小的金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)开关模块(178 mm×64 mm×31 mm), 可以给出上升沿非常快的高压脉冲, 使用非常方便, 并且工作稳定可靠, 其工作原理如图 1 所示. 没有晶体管-晶体管逻辑(电路)TTL 信号输入时, 高压电源对高压电容 C<sub>s</sub> 充电. 当 TTL 信号输入时, HTS 导通, 高压电源和被充

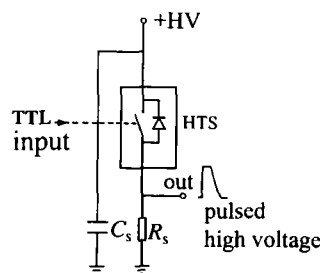


图 1 HTS 工作原理示意图

电的高压电容 C<sub>s</sub> 使负载电阻 R<sub>s</sub> 上的输出迅速达到预定的高压, 并在 TTL 信号宽度内保持不变. 当 TTL 信号结束时, HTS 断开, 负载电阻 R<sub>s</sub> 上的高压输出通过负载放电降为零电位, 完成高压脉冲输

收稿日期: 2003-09-26; 修改日期: 2003-12-24

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175005); 北京大学重离子物理研究所分析资金资助

作者简介: 丁富荣(1945—), 男(汉族), 山东曹县人, 教授, 从事核物理与核技术应用研究.

出,同时高压电源对高压电容 C<sub>2</sub>再次充电. 高压脉冲的幅度由高压电源决定,宽度和频率则由 TTL 信号控制. 本实验装置中使用的型号为 HTS -151, 高压脉冲的最大幅度为 15 kV, 上升时间约为 10 ns.

### 3 加速器束流脉冲化及 TOF 测量装置

进入预定束流输运线的束流经过第一对偏转板后(加高压 1 kV)(如图 2 所示)向下偏离束流输运线的中心线. 然后束流进入第二对偏转板,该偏转板与 HTS 产生的正高压脉冲相连,脉冲的宽度和频率由纳秒脉冲发生器的 TTL 信号控制,高压脉冲的幅度可以通过高压电源调节,一般为 5—10 kV 范围. 由于第二对偏转板与第一对偏转板的电场方向相反,束流则被反向偏转. 所以只有在第二对偏转板上达到某个电压(例如 V<sub>0</sub>)时,束流才能穿过位于束流输运线的中心线上的准直孔(φ3 mm)打到样品上,第二对偏转板上的电压高于或低于 V<sub>0</sub>时都没有束流通过准直孔,从而实现了加速器束流的脉冲化. 在准直孔的下方有一个具有对二次电子抑制的长方形法拉第杯(杯口的宽为 3 mm, 高为 20 mm),用来测量束流. 此结构可以保证在实验时对束流的测量不会受束流形状的影响. 实验中高压脉冲的宽度一般调整为 20 μs, 周期为 20 ms. 由于只有在高压脉冲上升前沿的部分时间内(约 2 ns)才能允许束流通过准直孔,所以真正打到样品上的束流只占法拉第杯上所测量到的束流的百万分之一,但到达样品上的粒子数目仍然十分巨大,完全能满足对二次离子发射的测量要求.

纳秒脉冲发生器中与 TTL 信号同步的另一路快负向脉冲(下降时间为 ns 量级)被输入到快定时甄别器,甄别器输出的快负向 NIM 信号输入到多路定标分析器(Turbo -MCS)的起始端,启动时间道(pass)的计时. 样品架由样品和栅网(透过率约为 90%)组成,其法线方向与束流方向成 45°角. 样品接正高压(10 kV),栅网位于样品前 8 mm,接地电位. 通过准直孔后的脉冲离子束穿过栅网打到样品上,从样品上解吸出的二次离子被样品与栅网之间的电场加速,二次离子最后获得的能量由样品与栅网之间的电压及二次离子的电荷态决定. 获得能量的二次离子穿过栅网飞行 40 cm 的距离后入射到微通道板(MCP)探测器上, MCP 的信号经 VT120

快前置放大器放大并甄别后,输入到 Turbo-MCS 的输入端. 由于能量相同而质量不同的粒子具有不同的飞行时间(TOF),所以 Turbo -MGS 就可以测量不同粒子的 TOF 谱. 通过分析计算,可以确定二次离子的种类(质量)和产额.

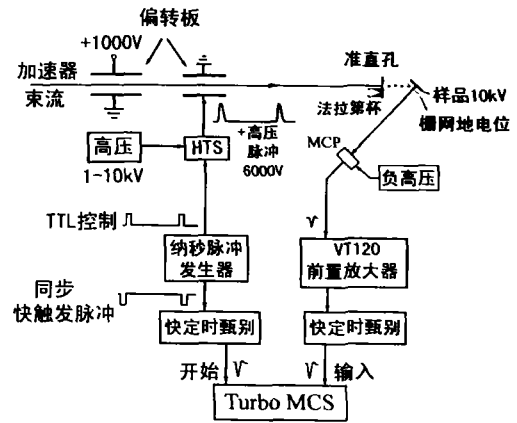


图 2 加速器飞行时间谱仪方框图

在我们的实验中,一般设定 Turbo -MCS 的 pass 长度小于高压脉冲的宽度(例如 20 μs). 当高压脉冲幅度下降时,该高压脉冲上升时所启动的 pass 已经结束,2 ms 以后才能开始下一个 pass,而二次离子的 TOF 又远远小于 2 ms,所以在这期间 Turbo -MCS 不再接收任何信号,这样就避免了在高压脉冲幅度下降时束流穿过准直孔后在样品上产生的二次离子对测量的影响. 实验时,束流输运线和靶室内的真空度小于 10<sup>-4</sup> Pa.

### 4 碳纳米管产生的二次离子 TOF 谱

将纯度为 98% 的碳纳米管压制成薄片样品,利用能量为 0.3—3 MeV/atom 的 Si 和 Si<sub>2</sub> 团簇离子分别轰击样品. 当样品与栅网之间的电压为 10kV

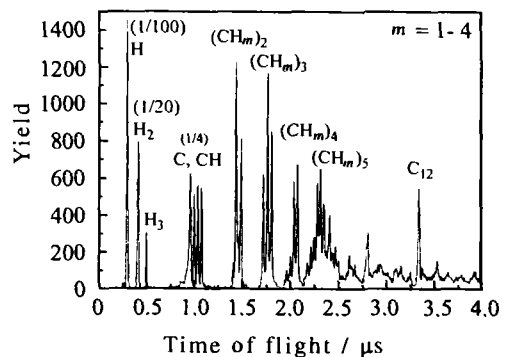


图 3 碳纳米管样品解吸出的二次离子的 TOF 谱

和栅网到 MCP 探测器的飞行距离为 40 cm 时, 碳纳米管样品解吸出的二次离子的 TOF 谱如图 3 所示. 我们还测量了 Au, Al 和 CsI 样品的 TOF 谱. 实验结果表明, 这些样品上产生的二次离子的 TOF 谱中 H, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub> 及碳氢化合物的产额只有碳纳米管样品的 1%. 所以可以确定 H, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub> 及不同的碳氢化合物主要来源于碳纳米管样品表面吸附的氢和碳纳米管化学合成后残余的碳氢化合物. 由于碳纳米管具有非常稳定的石墨六角形晶体结构, 所以 C<sub>12</sub> 则为碳纳米管在离子束轰击下产生的碎片.

## 5 载能 Si 离子和 Si<sub>2</sub> 团簇离子诱发氢二次离子发射的比较

根据不同能量的 Si 和 Si<sub>2</sub> 团簇离子轰击碳纳米管时所测量的二次离子的 TOF 谱, 分别计算出每一个 Si 原子产生的氢二次离子的产额. 图 4 显示了 H, H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub> 的总产额(左坐标)随每个原子质量单位的速度的变化特征. 从图 4 可以看出, Si 离子诱发氢(H, H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub>)离子的发射产额随入射离子速度的增大而缓慢增加; Si<sub>2</sub> 团簇离子诱发氢(H, H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub>)离子的发射产额在入射离子速度较低时随速度增大而迅速减小, 随着速度的增大, 其产额与 Si 离子诱发氢(H, H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub>)离子的发射产额基本相同. 为了研究氢离子发射产额与入射离子的阻止本领的关系, 利用 SRIM2000 程序计算不同能量的 Si 在碳中的核阻止本领和电子阻止本领<sup>[11]</sup>, 也显示在图 4 中, 对应右坐标. 在能量较高时, 电子阻止本领远远大于核阻止本领. 图 4 内的点划线是利用函数

$$Y = A \left( \frac{dE}{dx} \right)_e^3 + B \left( \frac{dE}{dx} \right)_n^4$$

的拟合曲线, 其中 Y 为氢(H, H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub>)离子的发射产额, A 和 B 为拟合常数, (dE/dx)<sub>e</sub> 为 Si 在碳中的电子阻止本领, (dE/dx)<sub>n</sub> 为 Si 在碳中的核阻止本领. 对于 Si 离子轰击碳纳米管, 拟合曲线与实验结果在能量较高的区域比较一致, 而在能量低的区域实验结果明显低于拟合曲线. 对于 Si<sub>2</sub> 团簇离子轰击碳纳米管, 拟合曲线与实验结果在给定的实验能量范围内符合得很好. 这说明在能量较高的区域内占优势的电子阻止过程对 Si 和 Si<sub>2</sub> 团簇离子诱发碳纳米管的氢二次离子发射起主要作用. 我们知道, 二次离子的发射主要发生在样品的近表面, 并

且由入射离子在样品近表面的能量沉积密度决定. 电子阻止过程造成的能量沉积依赖于电离过程产生的二次电子(δ 电子), 而 δ 电子的能量与入射离子的速度有关. 一般讲, δ 电子的作用范围比较大, 因此电子阻止过程在样品表面产生的能量沉积密度比较小. 所以电子阻止过程起主要作用的较高能区内氢二次离子的发射产额比较低. 而核阻止过程造成的能量沉积密度远大于电子阻止过程造成的能量沉积密度, 并随入射离子能量的增加而减少. 根据我

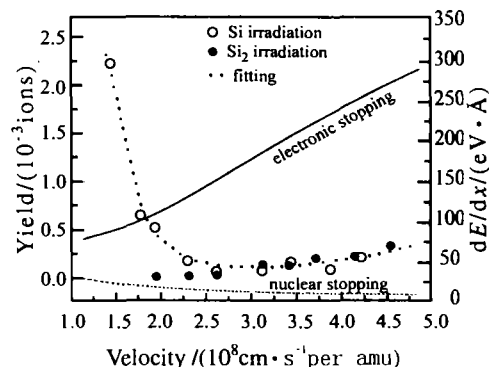


图 4 阻止本领和氢二次离子发射产额随入射离子速度的变化关系

们以前的实验结果<sup>[12]</sup>, 随着穿过薄膜厚度的增加, 团簇离子的核能损增强效应逐渐减弱. Si<sub>2</sub> 团簇离子在低能区域时产生的氢二次离子的高发射产额说明, 在低能区域 Si<sub>2</sub> 团簇离子在样品表面的核阻止本领有明显的增强效应. 因此 Si<sub>2</sub> 团簇离子与碳纳米管的核碰撞过程中的核能损增强效应对氢二次离子的发射起主要作用.

## 6 结论

快速高压晶体管开关可以非常方便地应用于加速器束流脉冲化和加速器 TOF 谱仪的建立. 通过该加速器 TOF 谱仪测量了碳纳米管在不同能量的 Si 和 Si<sub>2</sub> 团簇离子轰击下氢二次离子的发射, 并初步得到以下结论:

(1) 载能 Si 离子诱发氢(H, H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub>)二次离子的发射产额随入射离子速度的增大而缓慢增加, 电子阻止过程在氢二次离子发射中占主导地位.

(2) 载能 Si<sub>2</sub> 团簇离子诱发氢(H, H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub>)二次离子的发射产额在团簇离子速度较低时有明显的非线性效应, 即增强效应. 随着速度的增大, 其产额与 Si 离子诱发的氢(H, H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub>)二次离子的发

射产额基本相同, 电子阻止过程仍然占主导地位。在能量较低时,  $\text{Si}_2$  团簇离子在样品表面的核能损增

强效应则在氢二次离子发射过程起主要作用。

## 参 考 文 献:

- [1] Brunelle A, Della-Negra S, Depauw J, *et al.* Collisions of Fast Clusters with Solids and Related Phenomena [J]. Nucl Instr and Meth, 1997, **B125**: 207.
- [2] Andersen H H. Nonlinear Effects in Collisional Sputtering under Cluster Impact [J]. Matematisk-Fysiske Meddelelser, 1993, **43**: 127.
- [3] Beyec Y L. Cluster Impacts at keV and MeV Energies: Secondary emission phenomena [J]. Nucl Instr and Meth, 1998, **B174**: 101.
- [4] Bouneau S, Brunelle A, Della-Negra S, *et al.* Very Large Gold and Silver Sputtering Yields Induced by keV to MeV Energy  $\text{Au}_n$  Clusters ( $n=1-13$ ) [J]. Phys Rev, 2002, **B65**: 144 106.
- [5] Brunelle A, Della-Negra S, Depauw J, *et al.* Enhanced Secondary-ion Emission under Gold-cluster Bombardment with Energies from keV to MeV per Atom [J]. Phys Rev, 2001, **A63**: 022902.
- [6] Andersen H H, Brunelle A, Della-Negra S, *et al.* Giant Metal Sputtering Yields Induced by 20—5000 keV/atom Gold Cluster [J]. Phys Rev Let, 1998, **80**( 24): 5 433.
- [7] Johnson R E, Sundqvist B U R, Hedin A, *et al.* Sputtering by Fast Ions Based a Sum of Impulses [J]. Phys Rev, 1989, **B40**: 49.
- [8] Pereira J A M, Bitsensky I S, da Silveira E F. Effects of Charge State and Number of Constituents of MeV Projectiles on Secondary Ion Emission Yields from LiF [J]. Nucl Instr and Meth, 1998, **B135**: 244.
- [9] Ninomiya S, Imanishi N, Xue J, *et al.* Material-dependent Emission Mechanism of Secondary Atomic Ions from Solids under MeV-energy Heavy Ion Bombardment [J]. Nucl Instr and Meth, 2002, **B193**: 745.
- [10] Ghosh S, Avasthi D K, Som T, *et al.* Structure Dependent Electronic Sputtering of a-C : H Films by Swift Heavy Ions [J]. Nucl Instr and Meth, 2002, **B190**: 164.
- [11] Ziegler J F, Biersack I P, Littmark H. The Stopping and Ranges of Ions in Solids[M]. New York: Pergamon press, 1985
- [12] He W-H, Kang H-S, Shen D-Y, *et al.* Enhancement of Nuclear Energy loss of  $\text{Al}_3$  Cluster during Ion Beam Mixing [J]. Nucl Instr and Meth, 2003, **B201**: 449.

## Application of HTS in Pulsed Ion Beam of Scclerator and Study on Secondary Ion Emission of Hydrogen from Carbon Nanotubes under Bombardments of MeV Si and $\text{Si}_2$ Clusters\*

DING Fu-rong, SHI Ping, WANG Yao, NIE Rui, SHEN Ding-yu, MA Hong-ji  
(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The application of Fast High Voltage Transistor Switches (HTS) in pulsed ion beam and the time of flight(TOF) setup is described. Secondary ion emissions from carbon nanotubes under bombardments of MeV Si and  $\text{Si}_2$  clusters are measured by using TOF. The measurements indicate that the yield of the secondary ion emissions of hydrogen increases with increasing energy of Si and it is attributed to the electronic processes. The yield of the secondary ions of hydrogen decreases with increasing energy of  $\text{Si}_2$  clusters and the enhancement of nuclear energy loss of cluster constituents at the surface of sample plays a more significant role in the secondary ion emission of hydrogen at the low energies.

**Key words:** time of flight; clusler; secondary ion emission; stopping power

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10175005); Analysis Foundation of Institute of Heavy Ion Physics of Peking University