

用 20—1020 keV 单能质子刻度 CR-39 固体核径迹探测器

段晓礁¹⁾²⁾ 谭志新²⁾ 兰小飞²⁾ 黄永盛²⁾ 郭士伦²⁾ 杨大为²⁾ 汤秀章²⁾ 王乃彦¹⁾²⁾

1) (北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875)

2) (中国原子能科学研究院高功率准分子激光实验室, 北京 102413)

(2009 年 5 月 16 日收到; 2009 年 8 月 12 日收到修改稿)

用北京师范大学 2×1.7 MV 串列加速器和 400 kV 高压倍加器产生的 20—1020 keV 单能质子束对 CR-39 固体核径迹探测器进行了刻度. 为了保证质子的单能性和固体核径迹探测器上径迹密度不能超过 $10^6/\text{cm}^2$ 的要求, 对两台加速器分别采用了不同方法控制质子辐照数量. 在串列加速器上采用了狭缝加转盘的方法, 在高压倍加器上采用了 100 ns 单次高压脉冲扫描束流的方法, 既保持了质子的单色性, 又达到了质子注量小于 $10^6/\text{cm}^2$ 的要求. 刻度说明 CR-39 记录质子径迹的阈能为约 20 keV (或略低于 20 keV); 给出了 CR-39 测定 20—1020 keV 质子的刻度曲线 (径迹直径与蚀刻时间和质子能量的关系), 可用于核反应或激光打靶产生的质子的数目、能量和角分布的测定. 对高能质子 (320—1020 keV) 径迹的蚀刻动力学进行了研究, 用理论模型计算, 得到了与实验结果一致的曲线. 本文采用的控制质子束流的方法, 可用于类似的加速器实验刻度.

关键词: 单能质子, 固体核径迹探测器, CR-39

PACC: 2940W, 0777, 2960G

1. 引言

激光与等离子体相互作用会有大量离子发射出来, 测定这些离子的种类、产额、能量和角分布是了解激光与等离子体相互作用过程的手段之一^[1-3]. 这种相互作用持续时间很短 (约 10^{-12} s 或更短), 瞬间发射出的大量离子难以被粒子探测器——记录和分析. 一种有效的探测手段是采用固体核径迹探测器 CR-39 ($\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$). CR-39 是至今已发现的灵敏度最高的一种固体核径迹探测器之一. 它能记录质子和比质子重的离子, 并能通过径迹参数如径迹直径等分辨离子种类、能量和空间分布. CR-39 探测离子的灵敏度与生产厂家和采用的制备工艺有关, 在用 CR-39 鉴别和精确测定离子的种类和能量之前, 必须对它的灵敏度进行刻度. CR-39 的灵敏度可用它记录特定离子如质子的阈能表示. 当用 CR-39 探测质子时, 如果质子能量很低, 入射质子不能在 CR-39 表面生成可蚀刻的径迹, 只有质子能量超过某一能量时的一定能量范围内才能生成可蚀刻径迹. 这一最低能量 (阈能) 可以作为 CR-39 灵敏度的表示.

用加速器产生的单能质子直接辐照 CR-39 进行刻度的主要困难是低能加速器自身能提供的可控制和测量的束流太大, 最小束流一般为纳安量级. 相应的质子流量为 $10^{11}/\text{s}$, 而适合固体核径迹探测器 CR-39 测量径迹参数的径迹密度为 $10^6/\text{cm}^2$ 以下. 如果径迹密度过高, 蚀刻后径迹互相重叠, 无法精确测定径迹直径以及其他参数. 粗略的说, 如果可控制的辐照时间为 1 s, 用加速器提供的最小质子束流强度必须再减小四个量级以上, 才能用于固体核径迹探测器刻度. 作者至今尚未见到用加速器产生的低能单能质子对 CR-39 进行刻度的相关报道.

某些作者出于中子计量学^[4,5]、激光与等离子体相互作用^[6,7]、惯性约束聚变^[8]、奇异粒子探测^[9]和固体核径迹探测器机理研究^[10]的需要已对 CR-39 记录质子径迹的特性和阈能进行了研究. 为了降低辐照质子数目, 大部分作者采用背散射方法^[4-9], 即在加速器质子束前放置一定厚度的金箔或碳箔作散射体. 入射质子与散射体原子核发生卢瑟福散射, 被散射的质子向空间各个方向辐射, 在空间某一方向的某一距离处接收到的质子通量比加速器产生的质子束流强度小得多, 且能量下降. 利用卢

瑟福散射,可以获得适宜的质子能量和注量. 通常把 CR-39 探测器和金硅面垒半导体探测器分别放置于散射角为 135° 的对称位置(为了获得其他所需质子能量,也可放置于其他角度),用半导体探测器测定散射质子的能量和强度,由于相同散射角各位置质子能量和通量相同,可以得知辐照到 CR-39 探测器上的质子能量和注量. 另外一种获得较低能量质子的方法是采用能量吸收片如 Al 片和 Mylar 薄膜^[8,9]. 在 CR-39 探测器前放置一定厚度的吸收片,质子穿过吸收片时损失能量,同时穿过吸收片的质子数目减少,改变吸收片的厚度可以调节入射到 CR-39 探测器上的质子能量和数目.

以上两种降低质子能量和减少质子注量的方法存在一个共同的缺点,即加速器产生的单能质子通过一定厚度的散射体或吸收片后,出射质子的能散度增大,而且,出射质子的能量越低,相对能散度越大^[6,7,9]. 能散度很大的质子束相当于各种能量质子的组合,用它们刻度固体核径迹探测器的灵敏度不能确切反映探测器的能量特性和径迹大小. 为了使加速器产生的单能质子束不改变能量特性,并用它来刻度 CR-39 探测器,我们设计了两种装置和仪器,实现了用加速器单能低能质子对 CR-39 探测器的刻度. 一种方法采用狭缝和转盘限制质子注量,另一种方法在束流偏转电极上加 100 ns 单次方形脉冲,使质子束瞬间偏向置于束流侧面的 CR-39 探测器,减少辐照时间. 本文对以上两种在加速器上获得有限数目单能低能质子的方法以及用这种质子对 CR-39 进行刻度的结果进行介绍.

2. 实验装置及方案

2.1. 较高能量质子(220—1020 keV)辐照

较高能量质子由北京师范大学分析测试中心的 GIC4117 串列加速器产生^[11]. 能量范围为 200 keV—3.4 MeV,能散度小于 1%,束流强度最小为 30 pA. 为了减小束流,采用了狭缝结合旋转靶盘的方法,实验示意图如图 1. 狭缝宽度为 0.4 mm,狭缝前加一个开 1 cm 直径小孔的屏蔽板,质子束流强度由与狭缝连接的电流表测量,靶盘由匀速电机带动,转速由电压高低控制,最大转速为 100 r/min. 只有当转盘上的 CR-39 旋转到通过狭缝的质子束上时,才能被质子辐照. 选取七个能量点进行辐照:

220, 320, 420, 520, 620, 820, 1020 keV. 质子束垂直辐照到 CR-39 上.

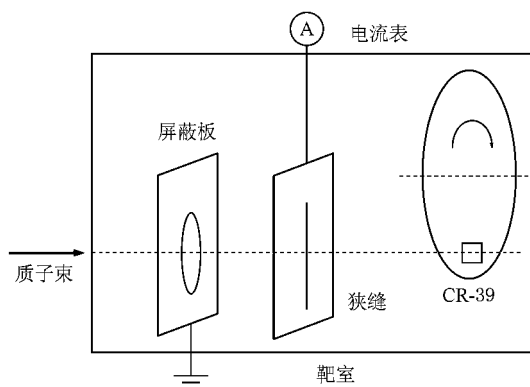


图1 高能质子标定实验示意图

实验中,控制转盘仅转过一圈,辐照时间为 CR-39 经过狭缝的时间,使用光电倍增管测量此时时间为 13.02 ms. 辐照到单位面积上的质子数为

$$N = \frac{It}{q} \frac{S_1}{S_2}, \quad (1)$$

其中 I 为在狭缝上测得的电流表示数, t 为 CR-39 经过狭缝的时间, q 为一个质子的电荷量, S_1 为束流通过狭缝的面积, S_2 为屏蔽板上小孔的面积. 经过计算, N 约为 10^5 个.

2.2. 低能质子(20—100 keV)辐照

低能质子由北京师范大学的高压倍加器(Cockcroft Walton 加速器, BNU400)产生. 能量范围为 20 keV—100 keV,能散度小于 2%,束流强度最小为 10 nA. 为了减小辐照在 CR-39 上的质子数,我们采取了减小辐照时间的办法,实验装置示意图如图 2. 高压脉冲加在偏转板上,初始时束流聚焦在偏离靶盘中心 5 cm 处,CR-39 放置在另一侧偏离中心 4 cm 处,当加上合适的脉冲电压时,质子束发生偏转,近似垂直的辐照到 CR-39 上,经过一个脉冲宽度后,束流回到初始位置,辐照停止. 对于不同能量的质子束流,要偏转同样的距离,需要不同的脉冲高压,因此需要脉冲信号发生器产生的高压连续可调. 我们自制的高压脉冲发生器具有输出电压幅值连续可调、上升前沿陡、脉宽窄等特点,其输出参数为:脉冲幅值 0—5000 V;脉冲宽度 100 ns;上升前沿 < 4 ns. 选取五个能量点进行辐照:20, 40, 60, 80 和 100 keV.

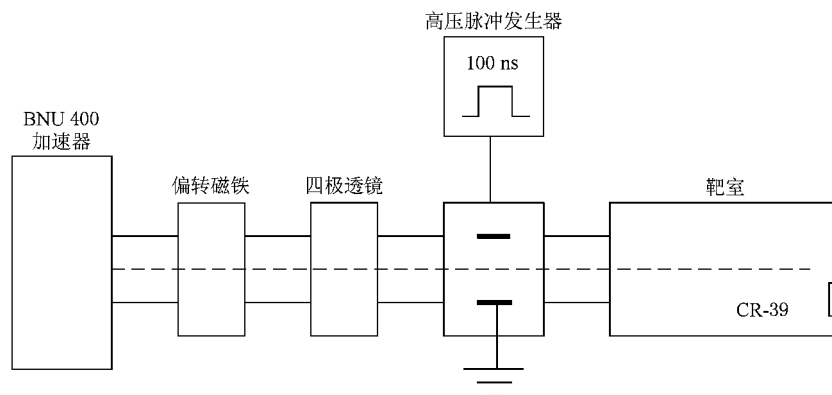


图2 低能质子标定实验示意图

2.3. 蚀刻和直径测量

样品尺寸为 10 mm × 10 mm × 1 mm (Fukui Chemical Industry, Tokyo, Japan)。

辐照后, CR-39 在 6 mol/L 的 NaOH 溶液中蚀刻, 采用恒温水浴将温度控制在 70 ± 0.1 °C, 蚀刻后先在稀盐酸中浸泡 1 h, 然后在流水下冲洗后在蒸馏水中浸泡 10 h, 最后取出晾干。

使用北京放射医学研究所提供的自动径迹图像分析仪^[12]测量质子径迹直径。光学显微镜下的光学图像经过 CCD 摄像, 变成模拟图像, 再由图像采集卡转换为数字图像, 通过图像处理, 实现径迹参数的测量。

CR-39 片每次蚀刻 3 h, 经过处理存取图形后, 再进行下一次蚀刻, 蚀刻溶液需重新配置, 以保证每次蚀刻条件相同。

3. 实验结果

3.1. 蚀刻曲线

蚀刻 9 h 后, CR-39 片经过自动测量系统测量并经过图像采集后所得径迹图像如图 3。其中每个图形的大小为 $160 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ 。图 3(a) — (1) 对应的质子能量分别为 20, 40, 60, 80, 100, 220, 320, 420, 520, 620, 820, 1020 keV。为了增加对比度, 使用 Matlab 程序进行二值化处理之后再行读数。图 3 中显示的是经过处理后的图像。

从图 3 中可以看出, 在蚀刻 9 h 之后, 能量高于 20 keV 的质子在 CR-39 上的径迹清晰可见, 仅仅在 20 keV 时径迹相对模糊, 说明质子的记录阈约在 20

keV 或稍小于 20 keV。

图 4 描绘了径迹直径在不同蚀刻时间下 (3 h, 6 h, 9 h) 与质子能量的关系曲线。图中数据点为实验数据, 每个点为 20 个值的平均值, 虚线部分用来帮助观测。从图中可以看出, 在各个时间下, 两台加速器产生的质子径迹的趋势保持一致, 能够连接成一条符合理论模型的光滑曲线。对比三条曲线, 可以发现, 蚀刻时间越长, 能量分辨率越高。但是蚀刻时间也不宜过长, 否则会使得低能质子的径迹变浅而难以测量其直径大小。在对能量小于 1 MeV 的质子作标定时, 蚀刻 9 h 已经能够提供足够的分辨率。对于较高能和低能质子, 可能出现径迹直径相同的情况, 这时可以简单的通过观测径迹深浅 (或图片灰度) 来判断。较高能量的质子径迹比很低能量的质子径迹灰度大得多, 易于分辨。

当前的实验条件下, 低能质子的蚀刻曲线是我们关心的重点。图 5 是 20 到 100 keV 数据点的蚀刻曲线。从图中可以看出, 不同能量的质子径迹直径都是随蚀刻时间增长的, 且这种增长速度随蚀刻时间变慢, 在最初的 3 h 内, 增长最为剧烈。对于 20 keV 能量的质子, 其径迹直径在 3 h 到 9 h 的时间内变化很小。随着时间的增长, 各条曲线之间的距离也有所增长, 此时对应的能量分辨率也提高了。

3.2. 蚀刻动力学

根据 Paretzke 等人的模型^[13], 假设体蚀刻速率 V_B 为常数, V_T 为径迹深度 z 的函数, 对于垂直入射的质子, t 时刻的蚀刻包括两个过程: 沿径迹方向蚀刻时间 t' 到达点 z' 及以 z' 为出发点沿与径迹方向成 $\alpha(z')$ 角方向蚀刻 $V_B(t-t')$, 如图 6, 其中 $z' \neq t'$, $\alpha(z')$ 由以下方程组决定:

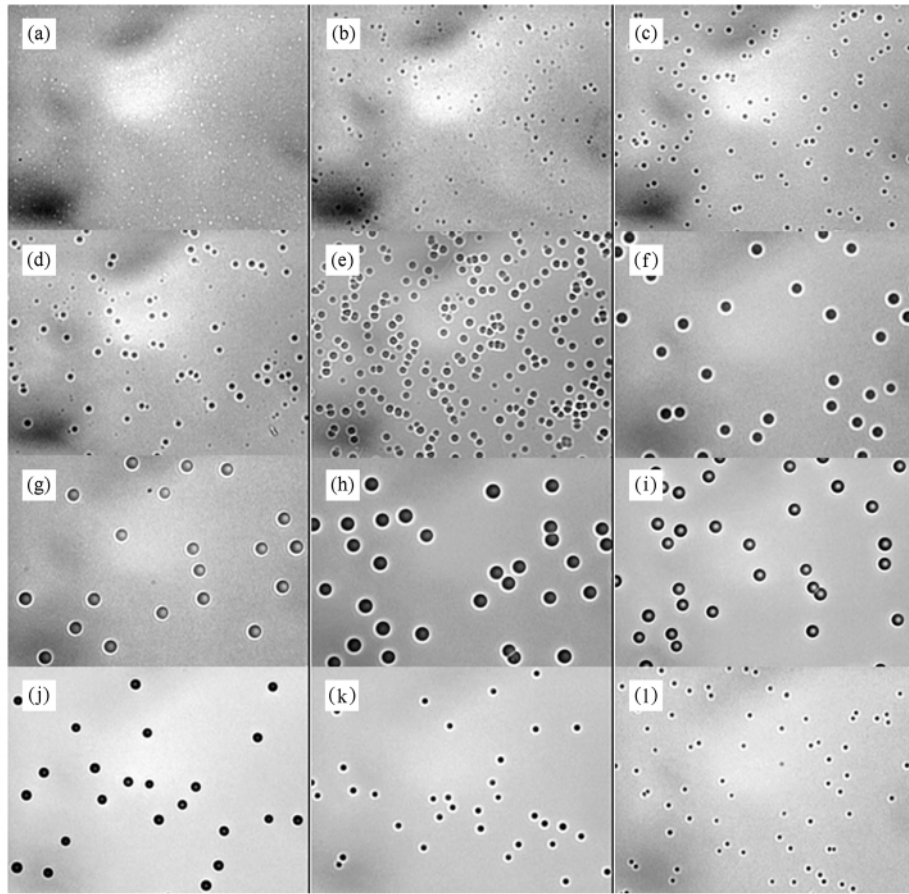


图3 蚀刻9 h后的径迹图像 (a)到(l)分别代表选取的12个能量点

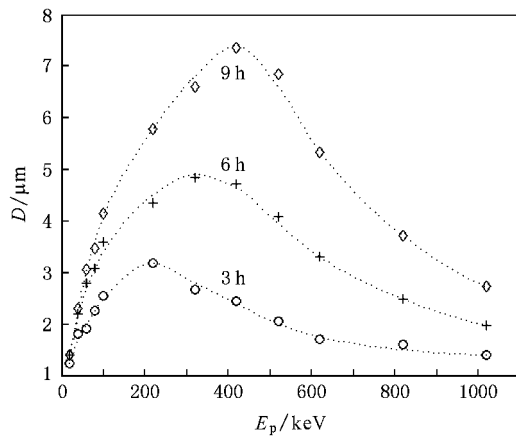


图4 不同蚀刻时间径迹直径与能量的关系曲线(每个径迹点为20个数据的平均值)

$$t' = \int_0^{z'} \frac{dz}{V_T(z')} , \quad (2)$$

$$V_B t = (z' - V_B t' \cos \alpha) / (1 - \cos \alpha) , \quad (3)$$

$$\cos \alpha(z') = V_B / V_T(z') , \quad (4)$$

则蚀刻时间 t 后对应的质子径迹半径为

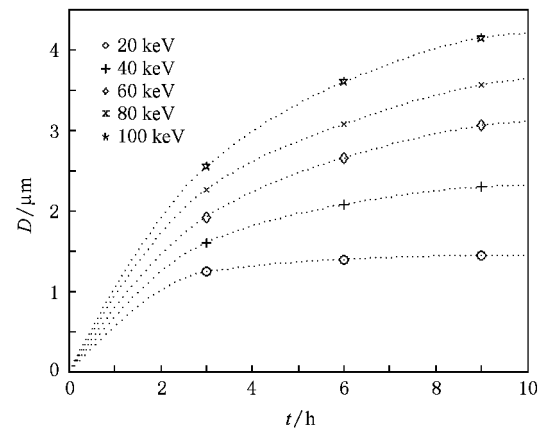


图5 低能质子的蚀刻曲线

$$r = \begin{cases} (V_B t - z') \tan \alpha , & t \leq t_2 , \\ \sqrt{2 V_B L_1 (t - t_1) - L_1^2} , & t > t_2 , \end{cases}$$

其中 t_1 t_2 L_1 由以下方程决定:

$$t_1 = \int_0^{R_0} \frac{dz}{V_T(z)} , \quad (5)$$

$$V_B t_2 = (R_0 - V_B t_1 \cos \alpha) / (1 - \cos \alpha) , \quad (6)$$

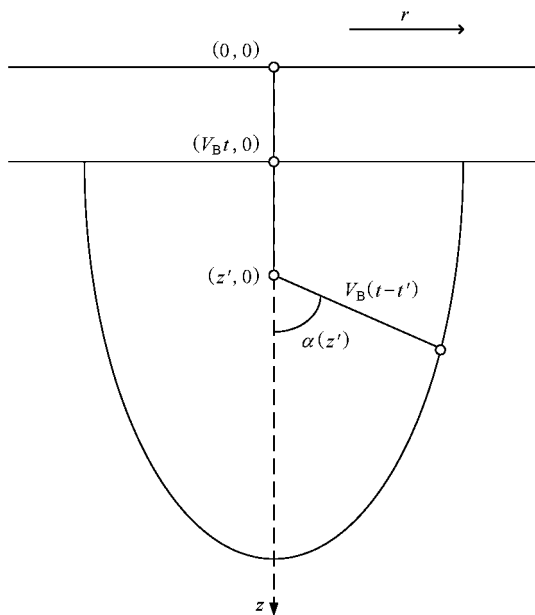


图6 径迹结构图

$$L_1 = R_0 - V_B t_1, \quad (7)$$

R_0 为离子在探测器中的射程.

由以上可知, 当 $V_B, V_T(z)$ 已知时, 即可求出不同蚀刻时间不同能量的径迹直径. V_B 通过测量蚀刻一段时间后 CR-39 片的厚度与蚀刻前的厚度之差来确定. 一般的, 取 $V_T(z)$ 为以下的形式:

$$V_T(z) = V_B [1 + f(z)] \\ = V_B \{1 + C_1 \exp[-C_2(R_0 - z)]\}, \quad (8)$$

其中 C_1, C_2 为常数, 当 $C_1 = 1.6, C_2 = 0.12$ 时, 320 keV 到 1020 keV 质子的蚀刻曲线如图 7 所示, 其中点线表示理论值, 实验数据用圆点表示, 两者符合很好, 因此可以用这些曲线作为高能质子的标定曲线.

4. 结 论

分别使用两种加速器产生的单能质子对 CR-39

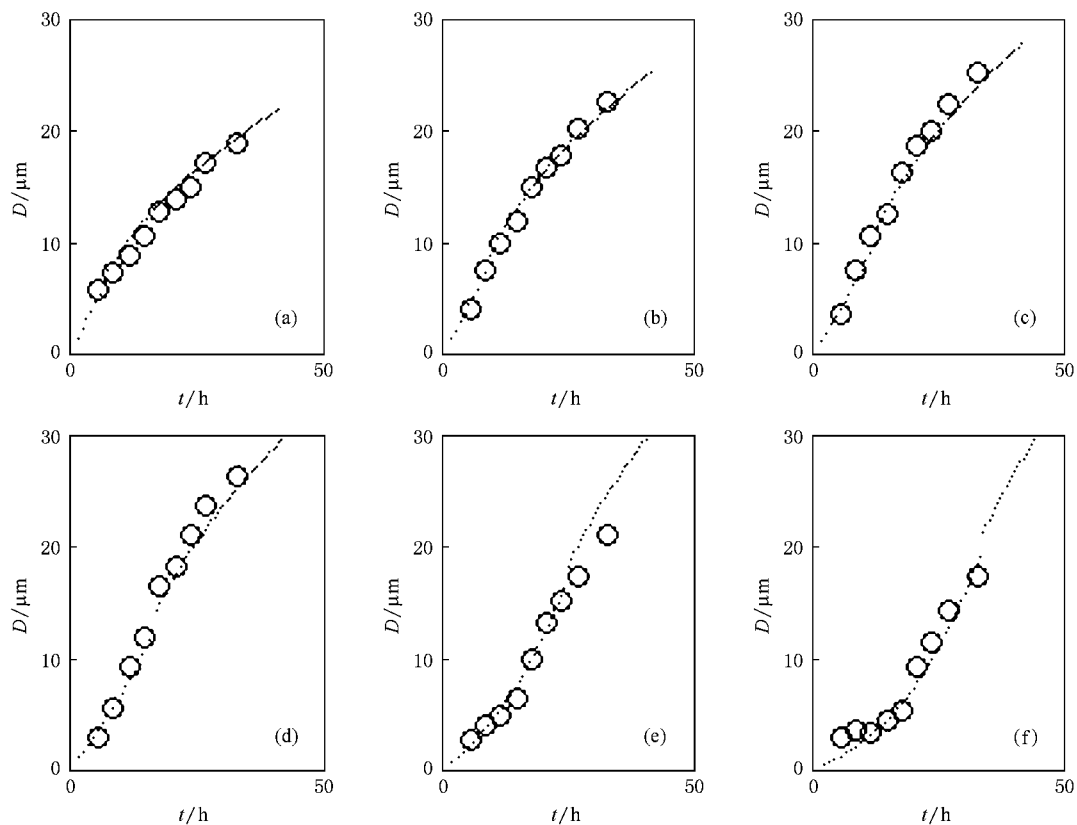


图7 实验结果与理论模型的比较(图中圆点表示的是实验数据, 点线表示理论值. 质子能量在 320 keV 到 1020 keV 范围, 蚀刻时间最长为 33 h) (a) 320 keV; (b) 420 keV; (c) 520 keV; (d) 620 keV; (e) 820 keV; (f) 1020 keV

进行了刻度. 第一次对能量低于 100 keV 的质子进行了准确的标定. 对于 200 到 1020 keV 的质子, 由

串列加速器产生, 采用狭缝结合旋转靶减少辐照时间. 对于 20 到 100 keV 的质子, 由高压倍加器产生,

利用自制的高压脉冲发生器将辐照时间固定在 100 ns. 对于能量高于 300 keV 的质子, 可以用理论模型来模拟蚀刻曲线. 实验结果表明 CR-39 记录质子径迹的阈能为约 20 keV (或略低于 20 keV); 给出了

CR-39 测定 20—1020 keV 质子的刻度曲线(径迹直径与蚀刻时间和质子能量的关系), 可用于核反应或激光打靶产生的质子的数目、能量和角分布的测定.

-
- [1] Fews A P, Norreys P A, Beg F N, Bell A R, Dangor A E, Danson C N, Lee P, Rose S J 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 1801
- [2] Gerard A Mourou, Toshiki Tajima, Sergei V. Bulanov 2006 *Reviews of Modern Physics* **78** 309
- [3] Schwoerer H, Magill J, Beleites B 2006 *Lasers and Nuclei, Applications of Ultrahigh Intensity Lasers in Nuclear Science* (Berlin Heidelberg: Springer)
- [4] Cross W G 1986 *Nuclear Tracks* **12** 533
- [5] Cross W G, Arneja A, Ing H 1986 *Nuclear Tracks* **12** 649
- [6] Szydlowski A, Sadowski M, Czyzewski T, Jaskóla M, Korman A 1999 *Nucl. Instrum. Meth. B* **149** 113
- [7] Sadowski M, Al-Mashhadani E M, Szydlowski A, Czyzewski T, Glowacka L, Jaskóla M, Rolfs C, Wielunski M 1995 *Radiat. Meas.* **25** 175
- [8] Seguin F H, Frenje J A, Li C K, Hicks D G, Kurebayashi S, Rygg J R, Schwartz B E, Petrasso R D, Roberts S, Soures J M, Meyerhofer D D, Sangster T C, Knauer J P, Sorce C, Glebov V Y, Stoeckl C, Phillips T W, Leeper R J, Fletcher K, Padalino S 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 975
- [9] Bernardi L, Cecchi A, Gori C, Lucarelli F, Renzi R 1991 *Nucl. Instrum. Meth. B* **53** 61
- [10] Baiocchi P, Cecchini S, Dekhissi H, Garutti V, Giacomelli G, Giani G G, Katsavounidis E, Iori G, Patrizii L, Popa V, Serra P, Togo V, Valdré U, Vilela E 1995 *Radiat. Meas.* **25** 145
- [11] Wang G F, Dong P 2002 *Journal of Beijing Normal University* **38** 628 (in Chinese) [王广甫、董平 2002 北京师范大学学报 **38** 628]
- [12] Luo Y S, Zhou Y, Wang X G 2002 *Nuclear Techniques* **25** 541 (in Chinese) [骆亿生、周郁、王兴功 2002 核技术 **25** 541]
- [13] Paretzke H G, Benton E V, Henke R P 1973 *Nucl. Instrum. Meth.* **108** 73

Calibration of solid state nuclear track detector CR-39 with monoenergetic protons

Duan Xiao-Jiao¹⁾²⁾ Tan Zhi-Xin²⁾ Lan Xiao-Fei²⁾ Huang Yong-Sheng²⁾ Guo Shi-Lun²⁾
Yang Da-Wei²⁾ Tang Xiu-Zhang Wang Nai-Yan¹⁾²⁾

1) (College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

2) (High Power Excimer Laser Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Received 16 May 2009; revised manuscript received 12 August 2009)

Abstract

Calibration of solid state nuclear track detector CR-39 was carried out with monoenergetic protons from 2×1.7 MV Tandem accelerator and 400 kV Cockcroft Walton accelerator in Beijing Normal University. To ensure the protons to have monoenergetic energy and reduce the track density to 10^6 cm^{-2} , two different methods were adopted. On the tandem accelerator a slit plus rotating target plate were used to achieve the required low density irradiation while a high voltage pulse generator with pulse duration of 100 ns was used on the Cockcroft Walton accelerator. The calibration shows that the registration threshold energy of protons in CR-39 is about or a little lower than 20 keV. The response curve of track diameter vs. etching time and proton energy for protons with energy from 20 keV to 1020 keV can be used to determine the number, energy and angular distribution of the protons produced by nuclear reaction and laser plasma acceleration. Etching dynamics of high energy protons (320—1020 keV) was studied. The theoretical curve is consistent with experimental data. This method of controlling the proton intensity employed in this paper could also be used in similar accelerator calibration.

Keywords: monoenergetic proton, solid state nuclear track detector, CR-39

PACC: 2940W, 0777, 2960G